



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

**NÁVRH A REALIZACE AUDIO VÝKONOVÉHO
ZESILOVAČE VE SPÍNANÉ TŘÍDĚ**

DESIGN AND REALIZATION OF SWITCHING CLASS AUDIO POWER AMPLIFIER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kristián Levocký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**
Ústav radioelektroniky

Student: Kristián Levocký

ID: 192184

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a realizace audio výkonového zesilovače ve spínané třídě

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se se spínanými třídami výkonových zesilovačů a pro vybranou třídu navrhnete audio výkonový zesilovač s výstupním výkonem $2 \times 100 \text{ W}$. Koncový stupeň doplňte korekčním předzesilovačem s možností ovládání hlasitosti, balance a průběhu kmitočtové charakteristiky s možností jejího grafického zobrazení. Parametry zapojení ověřte pomocí simulací ve vhodném simulačním programu (např. PSpice, LTspice, Micro-Cap).

Navrhnete napájecí jednotku pro výkonový stupeň a předzesilovač, navrhnete desky plošných spojů v programu Eagle a provedte celkovou konstrukci audio výkonového zesilovače předepsaných vlastností. Výsledný zesilovač ožijte, proměřte jeho základní parametry a srovnajte s výsledky získanými pomocí počítačové simulace.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ŠTÁL, P. Výkonové audio zesilovače pracující ve třídě D - základní principy a konstrukce. Praha: BEN - technická literatura, 2008.

[2] DOUGLAS, D. Audio Power Amplifier Design Handbook. New York: Newnes - ELSEVIER, 2006.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 23.5.2019

Vedoucí práce: prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

Konzultant:

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Bakalárska práca sa zaoberá návrhom audio zesilovač triedy D s výkonom 2x100W. Výkonový stupeň je riešený pomocou integrovaného obvodu TAS5630B od firmy Texas Instruments, korekčný predzosilovač je riadený štyrmi potenciometrami, ovládaný integrovaným obvodom TDA1524A. Zdroj je v spínanej podobe riadený obvodom TOP261EN. Celé zariadenie je inštalované do prístrojovej skrine s grafickým zobrazením a ovládacími prvkami.

Kľúčové slova

Audio zosilovač, trieda D, pulzne šírková modulácia, korekčný predzosilovač, spínaný zdroj

Abstract

This bachelor thesis describes design of audio amplifier of class D with power 2x100W. Power part is designed with integrated circuit TAS5630B made by Texas Instruments and correction preamplifier unit is regulated by four potentiometers, controlled by integrated circuit TDA1524A. Switching supply is regulated by circuit TOP261EN. Whole device is installed in device box with graphic display and control components.

Keywords

Audio amplifier, class D, pulse width modulation, correction preamplifier, switching supply

Bibliografická citace:

LEVOCKÝ, Kristián. *Návrh a realizace audio výkonového zesilovače ve spínané třídě* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/118417>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Lubomír Brančík.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh a realizace audio výkonového zesilovače ve spínané třídě jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **23. května 2019**

.....
podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce prof. Ing. Lubomírovi Brančíkovi, CSc. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

V Brně dne: **23. května 2019**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Zosilovač triedy D.....	12
2.1	Princíp zosilovača spínacej triedy.....	12
2.2	Podtriedy zosilovačov spínacej triedy.....	12
2.2.1	Trieda D.....	12
2.2.2	Trieda T.....	13
2.2.3	Trieda I.....	13
2.3	Modulátor.....	13
2.4	Koncový výkonový stupeň.....	14
2.3.1	Zapojenie do polovičného mostu.....	14
2.3.2	Zapojenie do plného mostu.....	15
2.5	Výstupný filter.....	16
3	Návrh zosilovača.....	17
3.1	Korekčný predzosilovač.....	17
3.2	Výkonový stupeň.....	18
3.3	Napájacia jednotka.....	23
3.3.1	Vstupný blok.....	24
3.3.2	Transformátor.....	24
3.3.3	Riadiaci obvod.....	26
3.3.4	Spätná väzba.....	27
3.3.5	Výstupný blok.....	27
3.4	Chladienie.....	28
3.4.1	TAS5630B.....	28
3.4.2	TOP261EN.....	29
3.4.2	BYV32-200.....	29
3.5	Grafické zobrazenie.....	30
4	Konštrukcia zosilovača.....	31
4.1	Návrh DPS.....	31
4.2	Prístrojová skriňa.....	32
5	Výsledky Merania.....	33
5.1	Korekčný predzosilovač.....	33

5.1 Výkonový stupeň.....	38
6 Záver	42
Zoznam príloh	44

Zoznam symbolov a skratiek

Zkratky:

PWM	...	Pulzne šírková modulácia
BCA	...	Balance Current Amplifier
IGBT	...	Insulated Gate Bipolar Transistor
MOSFET	...	Metal Oxid Semiconductor Field Effect Transistor
LCD	...	Liquid crystal display

Symboly:

f	...	frekvencia	[Hz]
U	...	napätie	[V]
Z	...	impedancia	[Ω]
P	...	výkon	[W]
R	...	odpor	[Ω]
G	...	zisk	[dB]
t	...	teplota	[°C]
THD+N	...	skreslenie	[%]
DNR	...	dynamický rozsah	[dB]
SNR	...	pomer signál a šum	[dB]

Zoznam obrázkov

Obr. 2.1: Blokové schéma audio zosilovača spínacej triedy	11
Obr. 2.2: Zapojenie zosilovača triedy D	12
Obr.2.3: Vznik signálu PWM.....	13
Obr. 2.4: Zapojenie koncových tranzistorov do polovičného mostu.....	14
Obr. 2.5: Zapojenie koncových tranzistorov do polovičného mostu	14
Obr. 3.1: Blokové schéma navrhovaného zosilovača.....	16
Obr. 3.2: Schéma zapojenia korekčného predzosilovača	17
Obr. 3.3: Vnútorne blokové schéma čipu TAS5630B	18
Obr. 3.4: Schéma zapojenia čipu TAS5630B s výstupným filtrom	20
Obr. 3.5: Schéma zapojenia simulácie výstupného filtra	21
Obr. 3.6: Modul prenosu a fázová charakteristika výstupného filtra	21
Obr. 3.7: Zapojenie redukcie napätia a kontroných indikátorov	22
Obr. 3.8: Elektrická schéma transformátoru z programu PIExpert	24
Obr. 3.9: Rozloženie vinutí na kostre transformátoru	24
Obr. 3.10: Blokové schéma TOP261EN (prevzaté z [8]).....	25
Obr. 3.11: Obr. 3.11 Znaký vytvorené pre potrebu zobrazenia vybudenia	29
Obr.5.1: Frekvenčná modulová charakteristika korekčného predzosilovača	32
Obr.5.2: Frekvenčná modulová charakteristika maximálnych korekcií	33
Obr.5.3: Závislosť zosílenia predzosilovača na polohe Volume potenciometru.....	34
Obr.5.4: Závislosť zosílenia predzosilovača na polohe Bass potenciometru	34
Obr.5.5: Závislosť zosílenia predzosilovača na polohe Treble potenciometru	35
Obr.5.6: Závislosť útlmu kanálu L a R na polohe Balance potenciometru	35
Obr.5.7: Závislosť skreslenia THD+N na frekvencii signálu rôznej amplitúdy	36
Obr.5.8: Frekvenčná modulová charakteristika výkonového stupňa	37
Obr.5.9: Linearita zosílenia koncového stupňa	38
Obr.5.10: Účinnosť závislá na výstupnom výkone	38
Obr.5.11: Skreslenie v závislosti na frekvencií	39
Obr.5.12: Skreslenie v závislosti na výkone	39

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 Základné parametry čipu TAS5630B.....	18
Tabuľka 2 Chybová tabuľka čipu TAS5630B	19
Tabuľka 3 Príkony jednotlivých častí.....	22
Tabuľka 4 Parametre obvodu TOP261EN.....	26
Tabuľka 5 Tepelné parametre obvodu TAS5630B.....	27
Tabuľka 6 Tepelné parametre obvodu TOP261EN	28
Tabuľka 7 Tepelné parametre diódy BYV32-200	22
Tabuľka 8 Porovnanie katalogových parametrov s dosiahnutými (predzosilovač)..	37
Tabulka 9 Porovnanie katalogových parametrov s dosiahnutými (koncový stupeň)	40

1 ÚVOD

Cieľom práce je navrhnúť a zhotoviť funkčný audio zosilovač v spínacej triede D ktorý bude s daným výkonom 2x100W použiteľný pre bežné reproduktory o záťaži 4Ω . Výkonový stupeň takéhoto zosilovača sa realizuje dvoma spôsobmi, a to buď budičom s príslušnými výkonovými tranzistormi alebo ako samostatný integrovaný obvod. Integrované audiozosilovače sa dnes používajú vo väčšine komerčných produktov ako mobilne telefóny notebooky a iné. Použitie integrovaného obvodu je veľmi výhodné, keďže zapojenie je oveľa jednoduchšie a priamo v čipe sú zahrnuté rôzne funkcie na ochranu pred zničením obvodu a iné. V tejto práci bola zvolená práve integrovaná forma z rozsahového a finančného hľadiska.

Zosilovač s takýmto výkonom je potrebné dotovať značným množstvom energie. Pre napájací zdroj máme dve možnosti, a to klasický alebo spínaný zdroj. Z hľadiska účinnosti ale aj iných výhod bol zvolený spínaný napájací zdroj. Klasické zdroje dosahujú účinnosť 30-50%, ich modernejšia náhrada v podobe spínaného zdroja až 80%, v lepších prípadoch sa vieme dostať aj cez 90%. Nevýhodou tohoto zdroja je rušenie spôsobené spínanými prvkami.

Korekčné predzosilovač môže byť realizovaný čisto pasívne (za pomoci RC prvkov) alebo pomocou aktívnych prvkov (u ktorých dochádza aj k zosíleniu). Moderné korektory zvyknú obsahovať audioprocesory.

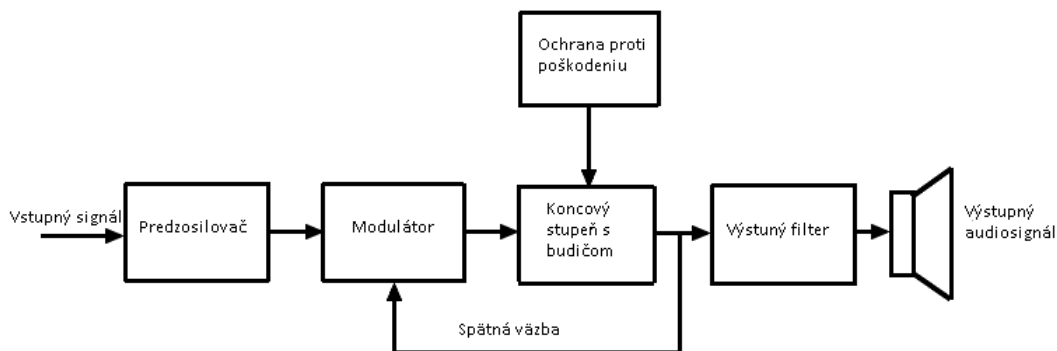
Zosilovač má vstavaný display riadený mikrokontrolérom na indikáciu vybudenia a signalizáciu poruchy na samotnom zariadení.

Zosilovač bude nainštalovaný do vlastnej skrinky ktorá vzhľadom na sieťové napájanie musí spĺňať bezpečnostné predpisy a zároveň ma prehľadné rozloženie ovládacích a indikačných prvkov.

2 ZOSILOVAČ TRIEDY D

2.1 Princíp zosilovača spínacej triedy

Základnú principiálnu schému audio zosilovača v spínacej triede môžeme vidieť na obrázku [2.1]. Vstupný audio signál prejde najprv impedančným oddelením v predzosilovači, následne prejde do modulátoru ktorý signál spracuje do podoby s ktorou dokážu pracovať tranzistory v koncovom stupni zosilovača. Koncový stupeň, ktorý môže byť zapojený do polovičného alebo plného mostu nám signál zosíli a stredná hodnota výkonových impulzov nesie potrebnú informáciu nášho audio signálu. Tento signál ešte pustíme cez výstupný filter dolnej prepusti, ktorý nám zabezpečí čistý nízkofrekvenčný audiosignál [1].



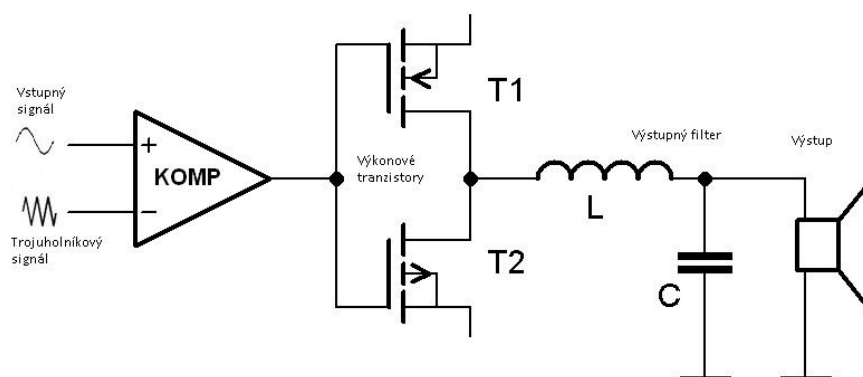
Obr. 2.1 Blokové schéma audio zosilovača spínacej triedy (prevzaté a upravené z [1])

2.2 Podtriedy zosilovačov spínacej triedy

Zosilovače spínacej triedy majú svoje podtriedy ktorá každá má svoje špecifické vlastnosti. Pre zaujímavosť budú spomenuté, avšak bližšie ich rozoberať nebudeme, keďže zadanie sa má venovať triede D.

2.2.1 Trieda D

V triede D sa využíva PWM (pulzná šírková modulácia). Za pomoci pílovitého signálu , ktorý musí byť podľa vzorkovacieho teorému aspoň dvakrát väčší ako vzorkovaný signál, sa v komparátore audio signál prevedie do PWM signálu. PWM signál je následne zosílený v koncových tranzistoroch a spektrum signálu je upravené vo výstupnom filtri. Zjednodušené schéma tejto triedy môžeme vidieť na obrázku 2.2. Najväčšou výhodou triedy D je vysoká účinnosť dosahujúca až 80% a vyššia , kdeže tranzistory pracujú v spínacom režime. Za nevýhodu oproti iným triedam ako napríklad A ,že tranzistor disponuje väčším skreslením [2].



Obr. 2.2 Zapojenie zosilovača triedy D (prevzaté a upravené z [1])

2.2.2 Trieda T

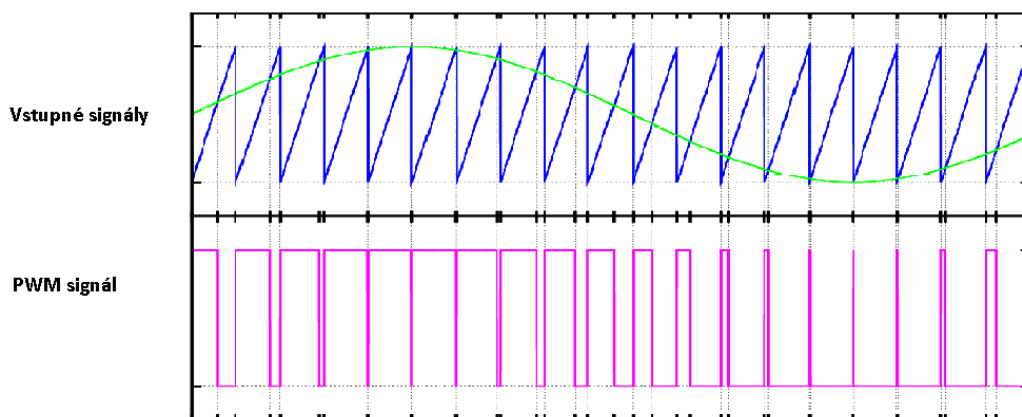
Trieda T pracuje na rovnakom princípe ako trieda D. Je to označenie ktoré si nechala registrovať firma Tripath. Túto triedu môžeme označiť ako D triedu s kontrolovanou PWM. Zosilovač je riadený procesorom. Zosilovač tejto triedy by mal byť schopný prepínať frekvenciu pílovitého signálu na základe vstupu a tým zabezpečiť lepšie kvalitatívne vlastnosti zosilovača.

2.2.3 Trieda I

Trieda-I, tiež známa ako BCA (Balanced Current Amplifier) je patent firmy Crown. Zosilovač využíva techniku symetrickej PWM. Funguje na podobnom princípe ako trieda D a T avšak použitý riadiaci procesor ma vstavané ďalšie dodatočne regulácie [3].

2.3 Modulátor

Za najdôležitejší blok zosilovača triedy D môžeme považovať práve komparátor, ktorý nám značne ovplyvňuje výsledné parametre. Zosilovač používa pulzne šírkový modulátor. Modulácia takéhoto modulátora je založená na komparátore, na ktorého jednom vstupe je pripojený signál, ktorý chceme zosíliť, a na druhom vstupe je pripojený pílovitý alebo trojuholníkový signál s ktorým ho porovnávame (tento signál musí mať podľa vzorkovacieho teóremu minimálne dvojnásobnú frekvenciu ako vstupný signál, čím vyššia šírka signálu tým lepšie – znížia sa nám tak hodnoty indukčnosti v dolnej prepusti). Komparátor zmení úroveň z nízkej na vysokú a naopak vždy keď oba signály dosiahnu rovnakú úroveň. Týmto získame impulzy rôznych šírok na výstupe komparátoru. Zosilovač s takouto moduláciou je potrebné na výstupe opatriť filtrom typu dolná prepusť a to z toho dôvodu, že PWM signál ktorý je tvorený strmými hranami impulzov tak môže z vodičov spraviť antény ktoré sú schopné vyžarovať vysokofrekvenčné rušenie.



Obr. 2.3 Vznik signálu PWM (prevzaté a upravené z [1])

2.4 Koncový výkonový stupeň

Z hľadiska výrobných technológií a princípov činnosti máme na výber tri základné typy tranzistorov a to bipolárne, IGBT a MOSFET. Najvhodnejšie a preto aj najčastejšie používané sú tranzistory MOSFET. Sú to tranzistory spínané elektrickým poľom ktoré najlepšie vyhovujú požiadavkám pre spínanie vysokých frekvencií. Od tranzistorov je požadovaný malý odpor v zopnutom stave (nízky úbytok napätia v tomto stave), čo najkratšia doba zapnutia a vypnutia aj nízke hodnoty parazitných kapacít. Bipolárne tranzistory sú v porovnaní s MOSFET výkonnejšie, keďže sú ovládané zdrojom prúdu a v zopnutom stave vyžadujú kontinuálne (pre budiaci obvod náročnejšie) riadenie. IGBT obecné neumožňujú dosiahnuť vysoké spínacie frekvencie, ktoré sú požadované [1].

Na spínanie tranzistorov MOSFET s vysokou frekvenciou je nutné do elektródy GATE pustiť výkonový pulz. Pre veľmi rýchle spínanie tranzistoru sa môže špičková hodnota prúdu pohybovať v radoch spínaného prúdu tečúceho elektródou DRAIN [1].

Z hľadiska zapojenia koncových tranzistorov sa využíva výhradne zapojenie do polovičného alebo do plného mostu. To ako sú tranzistory zapojené nám vo výsledku ovplyvní topológiu výstupného filtra typu dolná prepust'.

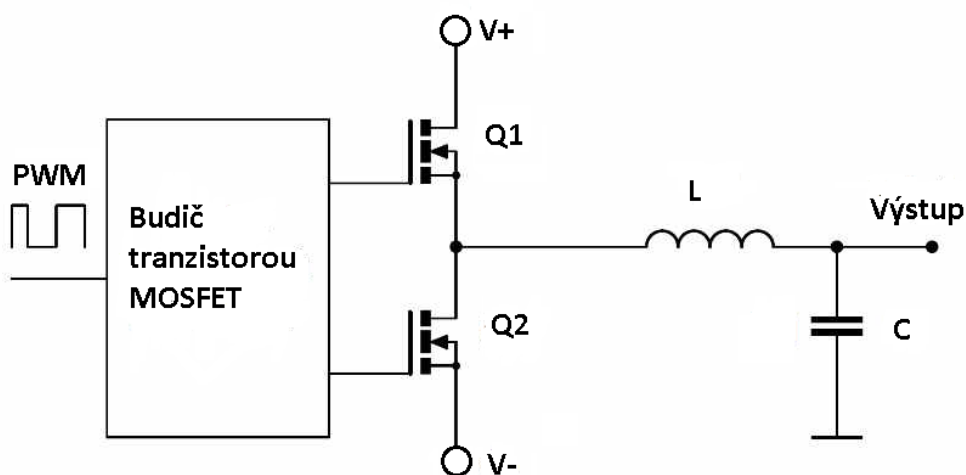
2.3.1 Zapojenie do polovičného mostu

Na obrázku 2.4 môžeme vidieť zapojenie koncových tranzistorov MOSFET typu N (Q1 a Q2) do polovičného mostu. Tranzistory sú napájané jednosmerným napätím symetrickým voči potenciálu zeme, čo je obvyklý nie však nutný spôsob napájania. Pred tranzistory je predradený blok budiča tranzistorov. Budič musí byť nastavený tak aby sa tranzistory nezopli zároveň, to by viedlo ku skratovaniu napájacieho zdroja a zničeniu tranzistorov. Pre opatrenie pred zničením sa preto využíva zavedenie určitého časového oneskorenia označovaného ako dead time.

Pri zapojení do polovičného mostu je vždy nutné zaviesť spätnú väzbu z výstupu, pre elimináciu jednosmernej zložky a nesymetrie napätia na výstupe.

Nevýhodou zapojenia do polovičného mostu je vznik takzvaného "bus pumping" javu. Tento jav je spôsobený snahou výkonového stupňa zosilovača o rekuperáciu komutačného prúdu späť do siete.

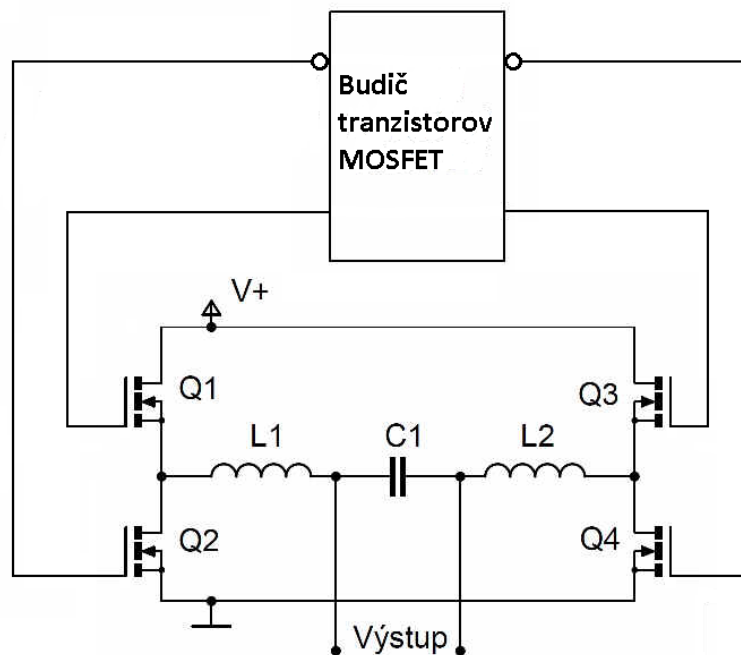
Tomuto javu sa môžeme vyhnúť použitím dostatočne dimenzovaných elektrolytických kondenzátorov na výstupoch výkonového napájacieho zdroja pre zosilovač [1].



Obr. 2.4 Zapojenie koncových tranzistorov do polovičného mostu (prevzaté a upravené z [1])

2.3.2 Zapojenie do plného mostu

Na obrázku 2.4 môžeme vidieť zapojenie koncových tranzistorov MOSFET typu N (Q1 až Q4) do plného mostu. Tranzistory sú v tomto prípade na rozdiel do zapojenia do polovičného mostu napájané z jednosmerného zdroja jednej polarity. Na výstup výkonového stupňa je zapojený filter dolnej prepusti druhého stupňa a výstupné napätie sa odoberá z výstupných svoriek. Tak ako u predchádzajúceho zapojenia aj tu musí byť budič nastavený tak aby sa nikdy nezopli naraz dvojice tranzistorov Q1 a Q2 alebo Q3 a Q4. Výhodou tohto zapojenia je absencia "bus pumping" javu. Naopak za nevýhodu môžeme považovať potrebu väčšieho počtu tranzistorov a zložitejšieho budiča a tým vyššie finančné nároky [1].



Obr. 2.5 Zapojenie koncových tranzistorov plného mostu (prevzaté a upravené z [1])

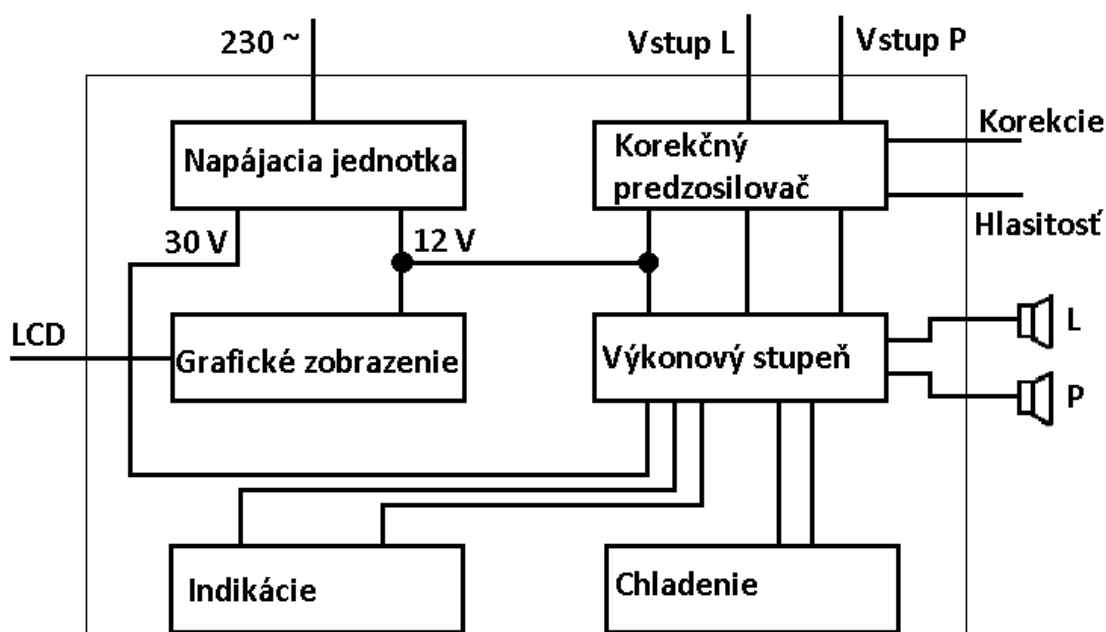
2.5 Výstupný filter

Výstupný filter u audio zosilovača triedy D v niektorých integrovaných formách nie je potreba, ale je potom nutné zapojiť výstupný reproduktor čo najbližšie a ideálne pripájať cez tienené káble. Táto možnosť sa nám však ponúka len ak implementujeme zosilovač do malých prenosných zariadení. V ostatných prípadoch kde je filter potrebný sa väčšinou realizuje ako pasívny LC dolná prepust' druhého rádu. Ak to integrovaný zosilovač používajúci špeciálnu moduláciu dovoľuje, je možné použiť filter zložený z feristoru a kondenzátoru, ktorý je síce rozmerovo menší, cenovo výhodnejší, ale je schopný zadržať frekvencie až od jednotiek MHz. Pasívne LC filtre tvoria mechanické a v porovnaní s vlastným čipom ťažké a rozmerné konštrukcie, stále však zanedbateľné v porovnaní s prvkami potrebnými u iných tried zosilovača. Niekedy sa lepšie potlačenie používa kombinácia vyššie uvedených filtrov [1], [4].

Zosilovače s výkonom v radoch desiatok Wattov sú opatrené výhradne LC filtrom typu dolná prepust' 2. alebo vyššieho rádu. Pri návrhu je nutné voliť zlomovú frekvenciu v ráde desiatok kHz, aby sa čo najviac potlačila nežiaduca časť spektra. Používa sa Butterworthova alebo Besselova aproximácia [1], [4].

3 NÁVRH ZOSILOVAČA

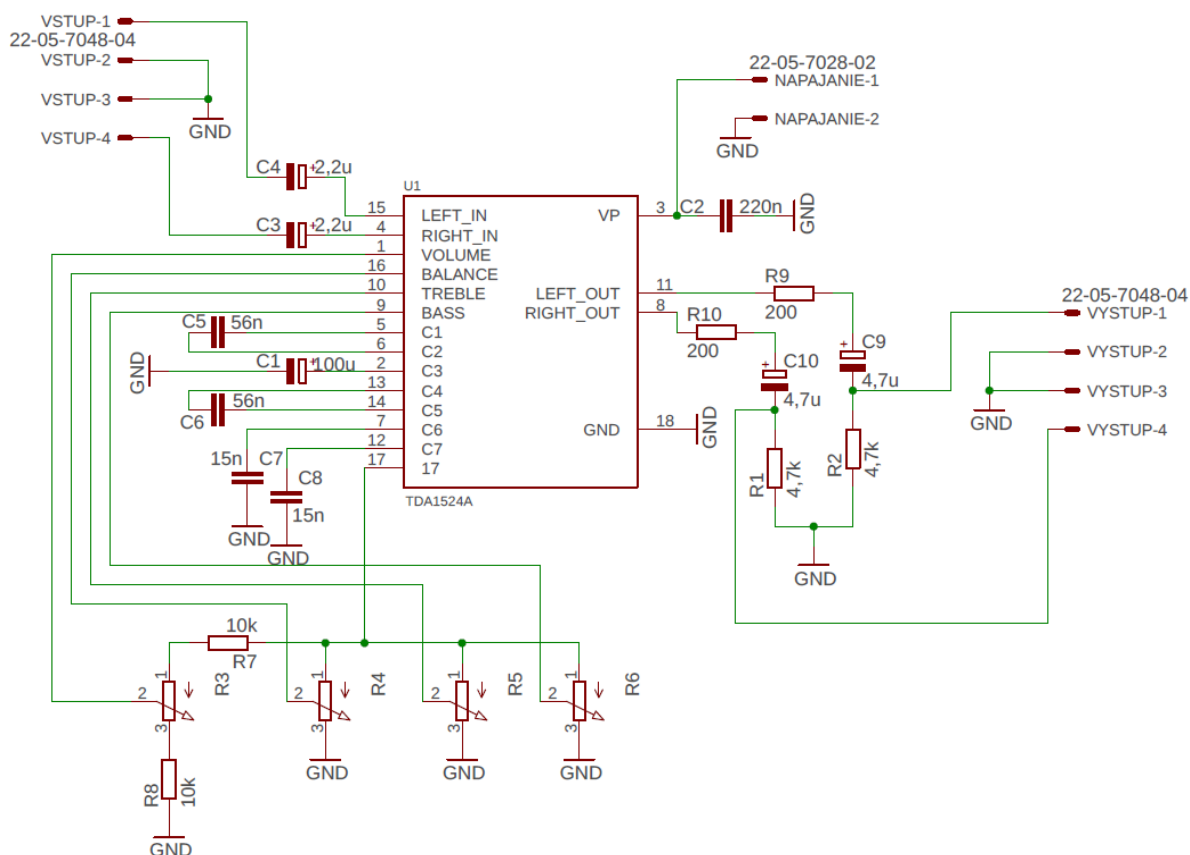
Na obrázku 3.1 môžeme vidieť blokové schéma navrhovaného zosilovača. Do korekčného predzosilovača vstupuje audio signál ktorý sa upraví korekčnými vstupmi na požadovaný tvar a je taktiež nastavená hlasitosť pomocou potenciometru. Upravený signál prejde do koncového výkonového stupňa. Odtiaľto vieme z predurčených pinov odoberať indikačné výstupy a informácie pre grafické zobrazenia. Celé zariadenie je napájané z napájacej jednotky ktorá je pripojená do siete 230V. Výstupom zariadenia je audio signál napájaný do reproduktorov a grafický výstup pre frekvenčné charakteristiky.



Obr. 3.1 Blokové schéma navrhovaného zosilovača

3.1 Korekčný predzosilovač

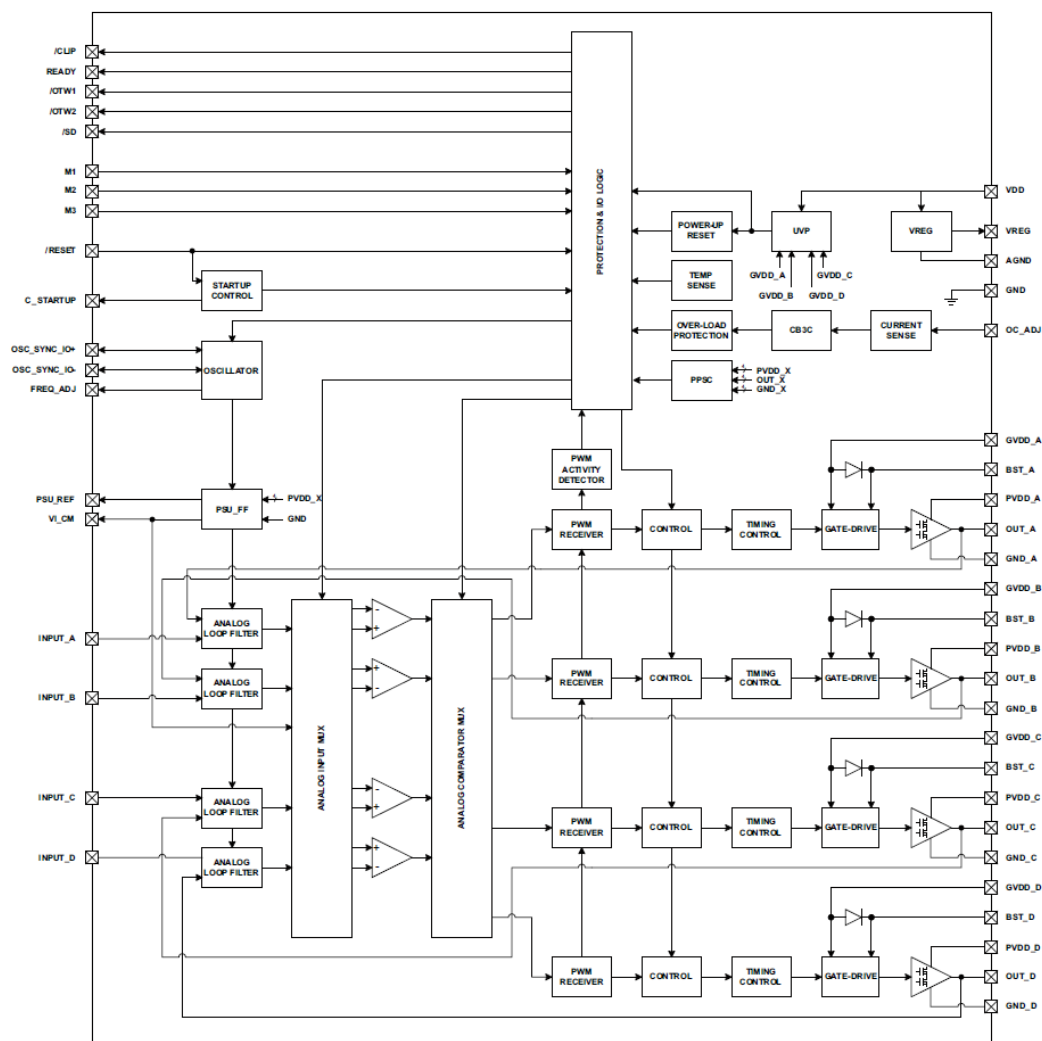
Na obrázku 3.2 vidíme schému bloku korekčného predzosilovača. Zapojenie môžeme nájsť v datasheete pre náš integrovaný obvod TDA1524A od firmy Philips. Pri výbere sa nám v tomto prípade naskytovalo nespočet možných integrovaných zosilovačov ktoré sú vyrábané práve pre tento účel. Obvod je napájaný napätím 12V zo sekundárneho vinutia napájacej jednotky. Je to stereo predzosilovač ktorý ma dva vstupy na pinoch 4 a 15 na ktoré sú vstupné signály privedené cez 4-pinový konektor a väzobné kondenzátory do obvodu. Dva výstupy sú rovnako odvádzané cez 4-pinový konektor. Integrovaný obvod je riadený jednosmernými napätiami z potenciometrov R3-R6 pomocou ktorých si vieme doladiť hlasitosť, symetrie, výšky a basy. Tým, že signál nám neprechádza priamo cez potenciometre, máme zaručené že nám nebudú chrastiť.



Obr. 3.2 Schéma zapojenia korekčného predzosilovača (prevzaté a upravené z [5])

3.2 Výkonový stupeň

Pre túto prácu bol vybraný výkonová časť vo forme integrovaného obvodu TAS5630B. Blokové schéma tohto čipu môžeme vidieť na obrázku 3.3. Ako môžeme vidieť obvod sa skladá z dvoch základných častí. Prvou je samotná výkonová časť ktorá obsahuje 4 kanály, čo znamená, že zosilovač môžeme zapojiť do plného mostu a budeme mať dva výstupné kanály. Signál z každého vstupu najskôr prejde cez spätno-väzobný filter a prejde do vstupného multiplexoru. V ďalšom bloku ANALOG COMPARATOR MUX dôjde ku komparácii a vzniku PWM signálu ktorý sa spracuje v recievery. V bloku kontrol prebieha riadenie signálu a v bloku TIMING controlu sa nastaví časovanie signálu (nastavenie dead timu). Blok GATE-DRIVE je budič samotných výkonových tranzistorov a je predposledný blokom pred výstupom. Signál prejde ešte samotnými výkonovými tranzistormi a je vyvedený cez piny OUT_(A-D). Z blokov GATE-DRIVE máme vyvedené výstupy BST_(A-D) ktoré nám slúžia pre zapojenie bootstrap kondenzátorov pre bootstrap riadenie. V integrovanom obvode je už zapojená pomocná dióda pre toto riadenie.



Obr. 3.3 Vnútročné blokové schéma čipu TAS5630B (prevzaté z [6])

Tab. 1 Základné parametry čipu TAS5630B (prevzaté z [6])

Parameter		Hodnota
P _{out} - výstupný výkon	Z _L = 4 Ω, THD+N = 10 %	300 W
	Z _L = 8 Ω, THD+N = 10 %	160 W
	Z _L = 4 Ω, THD+N = 1 %	240 W
	Z _L = 8 Ω, THD+N = 1 %	125 W
PVDD_X		25 - 52,5 V
GVDD_X, VDD		10,8 - 13,2 V
f _{PMW}		385 - 415 kHz
THD+N (100 W, 1 kHz)		< 0,05 %
Účinnosť		> 88 %
DNR (dynamic range)		100 dB
SNR (signal/noise)		100dB
R _{in}		33k Ω
G (gain)		23 dB

Druhou časťou čipu je riadiaca časť. V tejto časti môžeme vidieť bloky vstavaných ochrán ako ochrana pre podpätím v napájaní, limitácii, teplotnému preťaženiu alebo skratu na výstupe. Ďalej tam vidíme blok oscilátoru a blok samotnej ochrany a digitálneho logického riadenia. Čo sa ochrany týka na jednotlivých pinoch /SD, /OTW1 a /OTW2 môžeme pozorovať konkrétne logické úrovne pre jednotlivé závady. V prípade problému sa integrovaný obvod vypne a uvedenie do pracovného režimu sa realizuje zmenou logickej úrovne na pine /RESET.

Tab. 2 Chybová tabuľka čipu TAS5630B (prevzaté z [6])

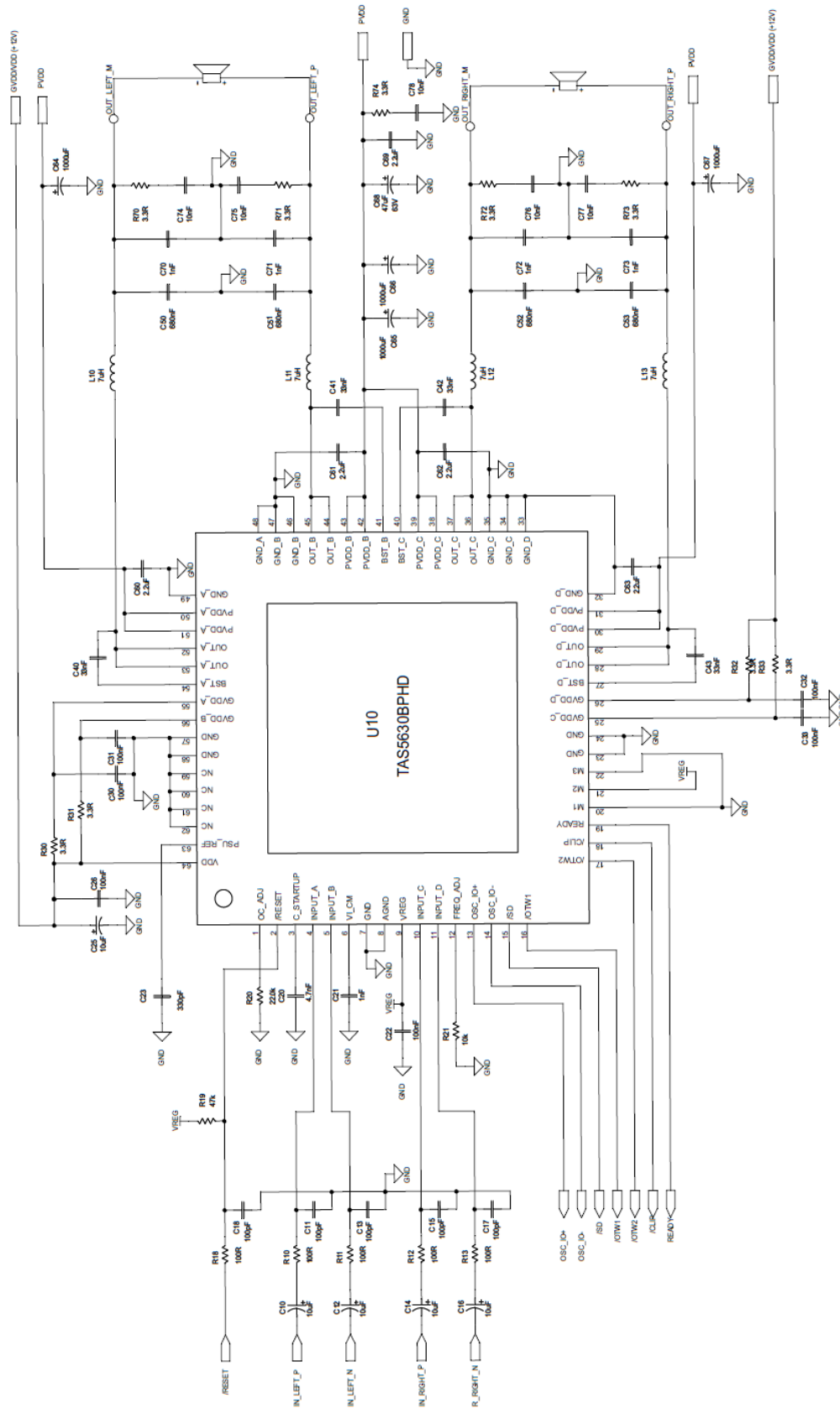
/SD	/OTW1	/OTW2	Popis
0	0	0	Prehriatie, preťaženie alebo podpätie
0	0	1	Preťaženie alebo podpätie a teplota čipu je vyššia ako 100 °C
0	1	1	Preťaženie alebo podpätie
1	0	0	teplota čipu je vyššia ako 125 °C
1	0	1	teplota čipu je vyššia ako 100 °C
1	1	1	teplota čipu je nižšia ako 100 °C , bez preťaženia alebo podpätia

Pomocou pinou M1, M2 a M3 môžeme zosilovač konfigurovať do rôznych výrobcov daných režimov :

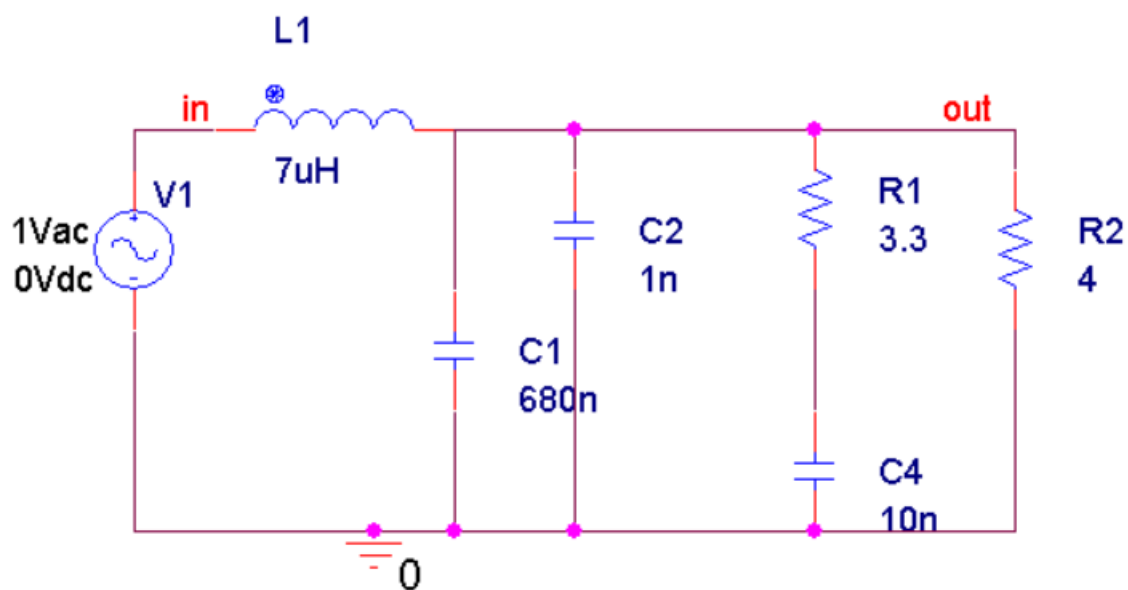
- 2xBTL – dva kanály zapojené do plného mostu (MAX 2x300 W)
- 1xBTL + 2xSE – jeden kanál zapojený do plného mostu plus dva kanály zapojené do polovičného mostu
- 4xSE – štyri samostatné kanály zapojené do polovičného mostu (MAX 4x145 W)
- 1x PBTL – jeden kanál s paralelne zapojeným výstupom (MAX 1x400 W)

Pre zadanie práce obvod pracuje v prvom zo spomenutých režimov 2x BTL.. Ľavý a pravý kanál, oba s výkonom 100W.

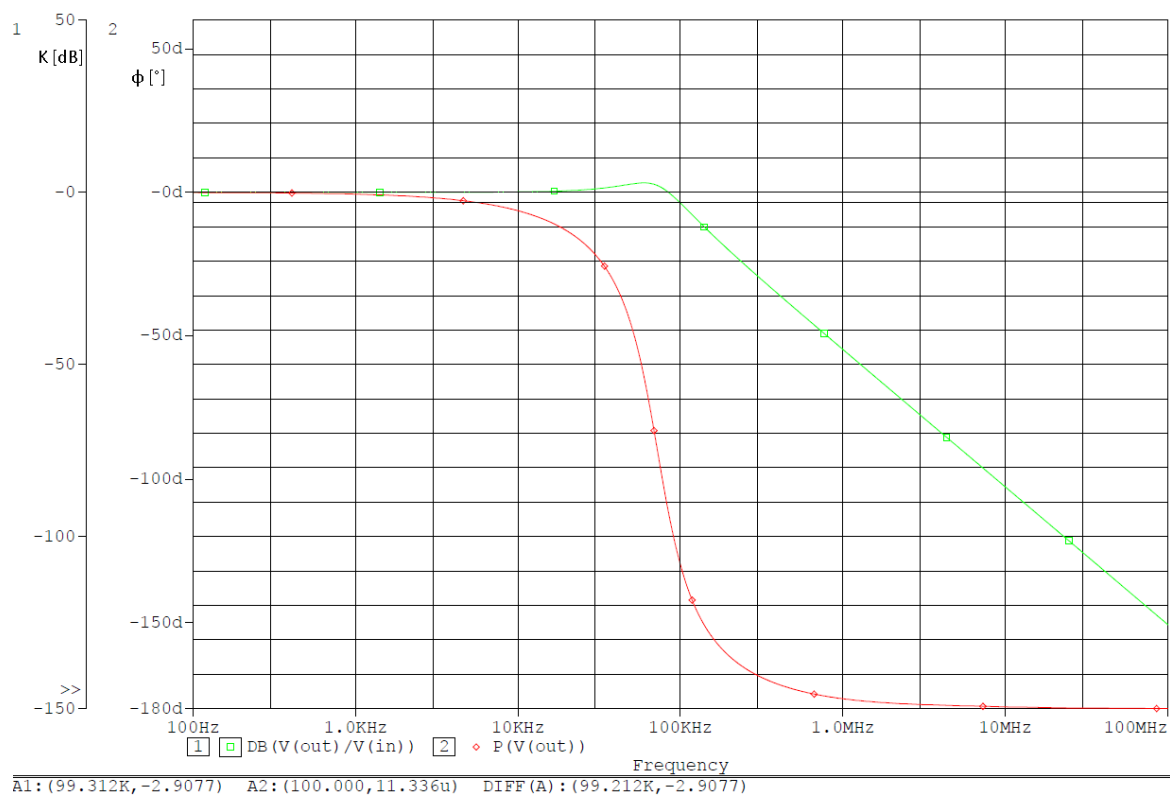
Na obrázku 3.4 je schéma zapojenia čipu TAS5630B aj s koncovým filtrom. Na vstup budú ešte zapojené predzosilovače , inak je schéma kompletná. Výstupný filter z datasheetu bol odsimulovaný v programe OrCAD, schému testovaného filtru môžeme vidieť na obrázku 3.5 a jeho modul prenosu (zelená krivka) a fázová charakteristika (červená krivka) sú vynesené v grafe na obrázku 3.6. odpor R2 predstavuje záťaž filtru. Kurzorom bola taktiež určená medzná frekvencia, ktorá je pre tento filter 99,3 kHz. Presná hodnota je vypísaná pod grafom v rámci kurzoru A1. Hodnota by sa dala určiť lepšie pridaním bodov zobrazenia na dekádu.



Obr. 3.4 Schéma zapojenia čipu TAS5630B s výstupným filtrom (prevzaté z [6])

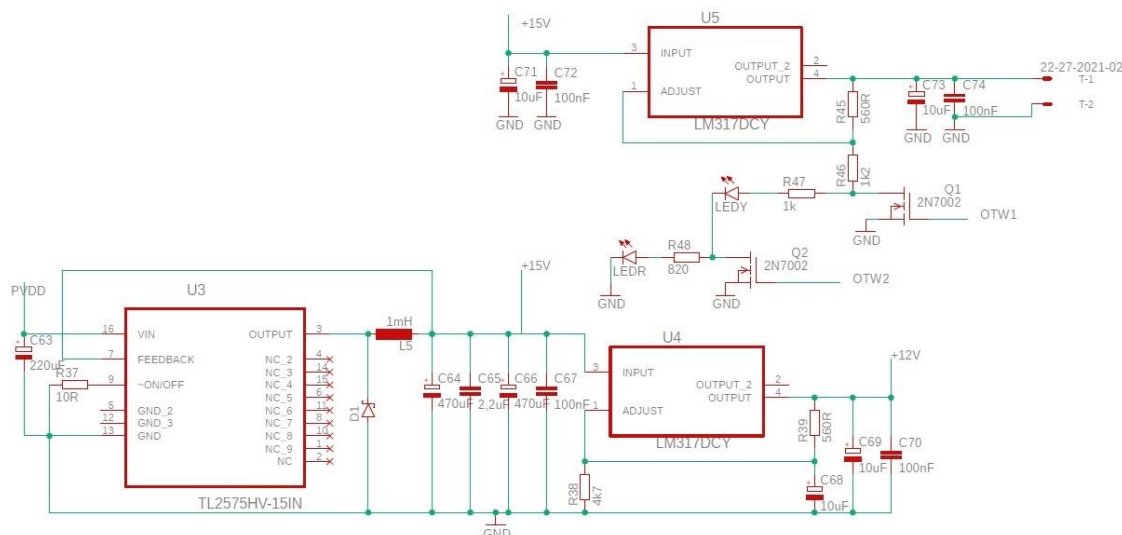


Obr. 3.5 Schéma zapojenia simulácie výstupného filtra



Obr. 3.6 Modul prenosu a fázová charakteristika výstupného filtra

Zapojenie chipu vyžaduje napätie 30V pre napájanie koncových tranzistorov a napätie 12V pre napájanie riadiacich obvodov. Pre dosiahnutie potrebných hodnôt je doska s koncovým stupňom rozšírená o obvod pre reguláciu napätia, S prídavnými kontrolnými indikáciami porúch na integrovanom obvode ktoré nebude zvonku vidno. Zapojenie obvodu vidíme na obrázku 3.7.



Obr. 3.7 Zapojenie redukcie napätia a kontrolných indikátorov

3.3 Napájacia jednotka

Navrhnutý zosilovač a jeho jednotlivé bloky potrebujú byť napájané určitým napätím, ktoré je potrebné generovať zo sieťového napätia. Z tohto dôvodu bolo potreba navrhnuť aj napájaciu jednotku. Tu sa nám naskytovali dve možnosti a to lineárny alebo spínaný zdroj. Podstatnými nevýhodami lineárnych zdrojov sú pri stúpajúcom výkone rastúci objem, hmotnosť, energetická účinnosť a cena. Preto bol zvolený práve spínaný zdroj ktorý pracuje na vyšších frekvenciách ako sieťových 50Hz a to až na stovkách kHz. Za hlavnú výhodu považujeme účinnosť oproti lineárnym zdrojom ktorá je až o 30% vyššia a to až 80%.

Tab. 3 Príkony jednotlivých častí

	Napätie [V]	Prúd [A]	Výkon[W]
Predzosilovač	12	0,8	9,6
Koncový stupeň	30	10	300

Pri zohľadnení rezerv by mala mať napájacia jednotka výkon približne 310W. Pre zdroj bol zvolený riadiaci integrovaný obvod z rodiny TopSwitch. Návrh prebehol v softvéri poskytovanom výrobcom tohto chipu PIExpert. Program poskytuje návrh zapojenia aj

s odporúčanými súčiastkami na použitie. Program navyše vygeneruje celé konštrukčné riešenie odporúčaného transformátoru a taktiež odporúčania k návrhu DPS pre napájaciu jednotku.

3.3.1 Vstupný blok

Vstupné sieťové napätie je v prvom rade odfiltrované proti šíreniu rušenia produkovaného spínacou jednotkou. Odrušene napätie je ďalej privedené na poistku ktorá nám ochráni zariadenie pred poškodením. Aby sa nám poistka neprepálila hneď pri zapnutí zdroja, je k nej umiestnený NTC termistor, ktorý potlačí vznikajúce špičky pri zapínaní pokiaľ sa nezahreje.

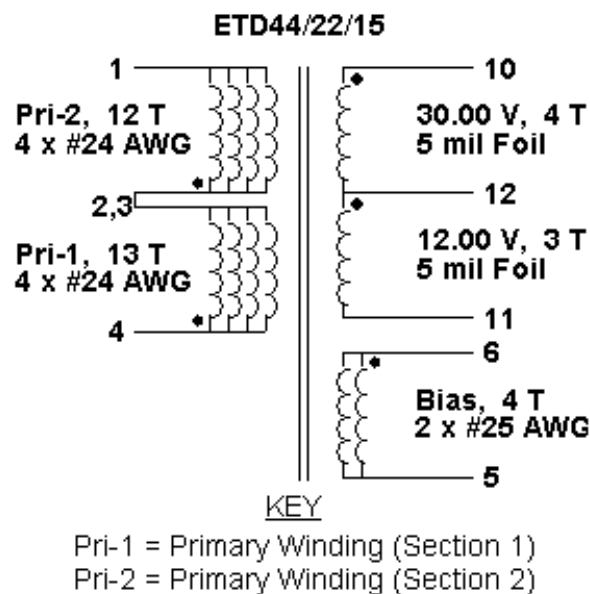
Sieťové napätie je následne privedené na usmerňovací most. Použitý bol odporúčaný most KBL406 so záverným napätím 600V dimenzovaný na 4A. požiadavky na filtračný kapacitor sú : zvládnutie napätia aspoň 340V a nízka hodnota ESR. Dohľadanie hodnôt ESR bolo obzvlášť zložité keďže predajcovia tento parameter bežne neuvádzajú a dokonca ho neobsahujú ani datasheety mnohých súčiastok. Vybraný bol kondenzátor s kapacitou 330uF dimenzovaný na napätie 400V.

3.3.2 Transformátor

Transformátor pre spínaný zdroj sa vyznačuje malými rozmermi, čo bola jedná z vlastností prečo bol vybraný. Avšak je veľmi dôležité použitie správneho materiálu jadra pre tento výkon a frekvenčné pásmo [7].

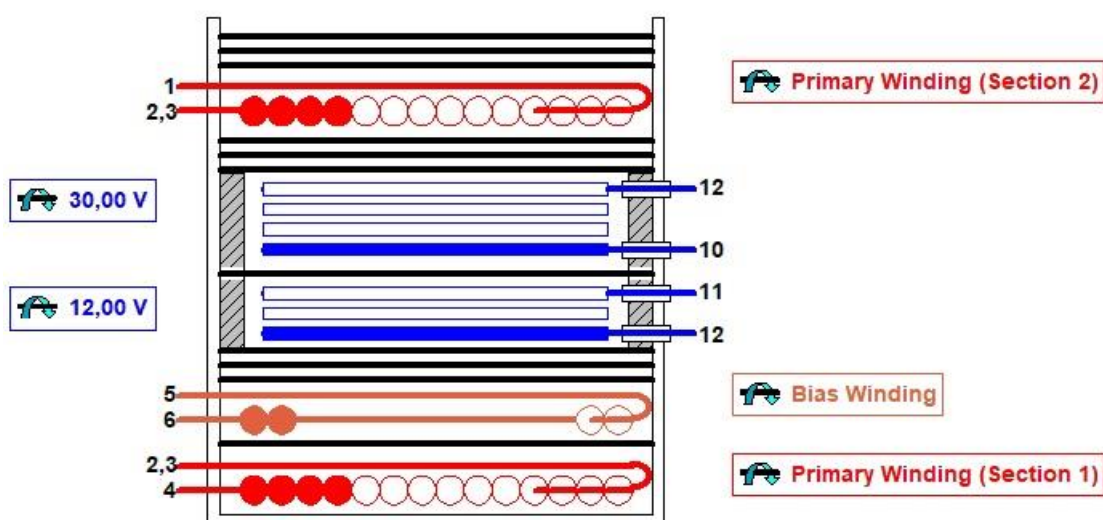
Výrobou týchto transformátorov sa zaoberá len veľmi málo firiem v Čechách a na Slovensku. Po dlhom pátraní bola vybraná firma BV Electronic ktorá bola ochotná tento transformátor na zákazku vyrobiť.

Pri výrobe týchto transformátorov je potrebné zohľadniť viacero faktorov ako napríklad vysokú pracovnú frekvenciu. Pri vysokých frekvenciách sa uplatňuje skin efekt na vinutí transformátoru. Z tohto dôvodu sa používa na primárnom vinutí buď viacero tenkých paralelných vodičov alebo priamo na tieto účely vyrábané vysokofrekvenčné lanko [7].



Obr. 3.8 Elektrická schéma transformátoru z programu PIExpert

Na obrázku 3.8 vidíme navrhnutú elektrickú schému transformátoru. Na ľavej strane je primárne vinutie rozdelené na dve samostatné časti, pre zníženie rozptylovej indukčnosti. Obidve vinutia sú spojené na pinoch č.2,3 . Na pin č.1 je privedený vstup primárneho vinutia a na pin č.4 je spojený s drain elektródou spínacieho tranzistoru v riadiacom obvode TOP-Switch. Na pravej strane máme sekundárne vinutia pre 30V medzi pinmi č.10 a 12, vinutie pre 12V medzi pinmi č.11 a 12 a kontrolné (Bias) ktoré slúži pre napájanie riadiaceho obvodu.

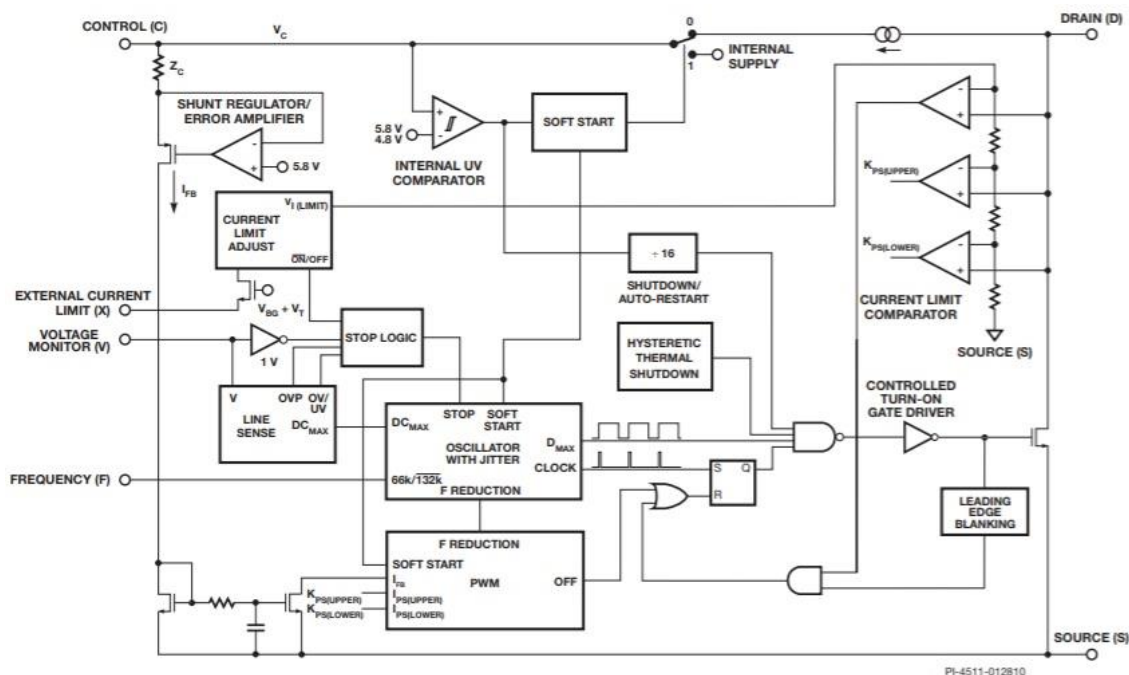


Obr. 3.9 Rozloženie vinutí na kostre transformátoru

3.3.3 Riadiaci obvod

Riadiaci obvod pre napájaciú jednotku musel byť vybraný z najvýkonnejšej triedy TOPSwitch-HX od Power Integrations. Jedná sa o integrovaný obvod TOP261EN ktorý je schopný riadiť zdroje až o výkone 333W. Obvod obsahuje radu analógových a číslicových systémov pre reguláciu a riadenie zdroja s výkonovým spínacím tranzistorom. Obvod je taktiež vybavený detekciou pod/prepätia, ktorého limitné hodnoty sa nastavujú rezistorom na pine V. Detekcia podpätia necháva obvod vo vypnutom stave a detekcia prepätia obvod vypne pri prekročení určitej hranice. Ďalšou výhodou je tepelná ochrana ktorá vypne spínací tranzistor po prekročení teploty 150°C. Obvod obsahuje aj prúdové obmedzenie ktoré v prednastavenom stave chráni obvod pred prúdom väčším ako 7,4 A. Táto hodnota sa dá podľa potreby regulovať pripojením externého rezistoru.[8]

Na obrázku 3.9 môžeme vidieť blokové schéma riadiaceho obvodu s popisom jednotlivých blokov a výstupmi pinov. Piny D a S su vývody MOSFET tranzistoru. Pin F slúži na nastavenie spínacej frekvencie, ak sa spojí s vývodom source bude nastavená frekvencia 132kHz a pri spojení s pinom C bude frekvencia polovičná. Pinom X nastavujeme prúdové obmedzenie zdroja , ktoré bolo ponechané na 7,4A ktoré nastavuje odpor 6,8k Ω . Na pine V nastavujeme pomocou externého rezistoru ochrany pre/podpätia. Pre zvolený odpor 4,7M Ω je hodnota prahu podpätia 120,5V a hodnota prepätia 529,4V. Na pin C sa napája napájanie integrovaného obvodu a spracuje signál spätnej väzby [8].



Obr. 3.10 Blokové schéma TOP261EN (prevzaté z [8])

Tab. 4 Parametre obvodu TOP261EN

Parameter	Hodnota
Max. výkon	333 W
Odpor kanálu zopnutého tranzistoru	1,8 Ω
Spínacia frekvencia	66/132 kHz
Max. teplota chipu	150 °C
Max. prúd drainom	11,1 A

3.3.4 Spätná väzba

Napätie pre spätnú väzbu je snímané z 30 V vinutia. Spätná väzba je realizovaná optronom (galvanické oddelenie signálu sekundárnej a primárnej strany) s napäťovou referenciou a je snímaná riadiacim obvodom na pine C ktorý upraví striedu spätnoväzobného signálu. Presnosť tejto spätnej väzby je 5% pre 30 V výstup a 10% pre 12 V výstup [7].

3.3.5 Výstupný blok

Výstupný blok zdroja sa skladá z usmerňovača a flitru. Usmerňovač musí byť na výstupe tvorený ultrarýchlou diódou s krátkou zotavovacou dobou. V prípade použitia pomalej diódy určených pre napríklad pre 50 Hz, dochádzalo by k vzniku veľkého nežiaduceho stratového výkonu a tým k malej účinnosti zdroja. Zvyknú sa používať shottkyho diódy ktoré sa vyznačujú potrebnými vlastnosťami. Druhým dôležitým parametrom je záverné napätie ktoré dióda dokáže vydržať. So všetkými týmito parametrami návrhový software počítal a navrhol nám variantu použiteľných diód [7].

Pre predstavu uvedený vzorec pre výpočet potrebného záverného napätia

$$U_R = 1,25 \cdot (U_S + U_{MAX} \cdot \frac{N_S}{N_P})$$

kde U_S je napätie sekundárneho vinutia, U_{MAX} je maximálne napätie dosiahnuteľne na primárnom vinutí, N_S je počet obtočení sekundárneho vinutia a N_P je počet obtočení primárneho vinutia [7].

Po dosadení nám vyjde $U_{R30} = 168,75$ V a $U_{R12} = 71,24$ V. Týmto hodnotám boli zvolené podľa dostupnosti diódy BYV32-200 pre 30 V vinutie a BYV27-200 pre 12 V vinutie.

Za diódy sa zapájajú vyhladzovacie kondenzátory označené ako Super Low ESR ktoré majú hodnotu zvlnený prúd vyšší ako ten vypočítaný softwarom. Pre 30 V vinutie bolo navrhnuté paralelne zapojenie šiestich kondenzátorov 330uF/50V a pre vinutie jeden kondenzátor 220uF/25V.

Poslednou časťou je LC filter. Tlmivka o veľkosti indukčnosti 1,5 uH pre výstup 30 V je dimenzovaná na 18 A na železo-prachovom jadre vyrobenou na zákazku firmou BV Electronics. Pre 12 V výstup bola použitá sériovo vyrábaná axiálna cievka o veľkosti indukčnosti 3,3 uH. Oba výstupy sú vybavené kondenzátormi s kapacitou 100uF.

3.4 Chladenie

Viacero súčiastok v návrhu vyžaduje kvôli výkonovej zaťažiteľnosti chladenie vo forme pripevneného chladiča. Tieto chladiče musia byť riadne navrhnuté aby mali dostatočný odvod tepla. Pre výpočet budeme uvažovať extrémne podmienky kedy bude celé zariadenie uzavreté v skrini povedzme umiestnene na slnku a teplota vo vnútri skrine bude dosahovať povedzme 50 °C. Skriňa zariadenia bude ešte vybavené ventilačnými otvormi pre zabezpečenie lepšieho prúdenia vzduchu a chladenia celého zariadenia.

3.4.1 TAS5630B

Z datasheetu pre chip sme odčítali hodnoty potrebné pre výpočet :

Tab. 5 Tepelné parametre obvodu TAS5630B

Parameter	Hodnota
Stratový výkon	30W
Tepelný odpor čip - puzdro	0,2°C/W
Maximálna teplota čipu	150°C

Medzi spojením puzdra a chladiča nám vzniká taktiež tepelný odpor ktorý môžeme v nedokonalom prípade uvažovať 1 °C/W. Pre tepelný odpor požadovaného chladiča bude teda :

$$R_{tCH} = \frac{t_{cMAX} - t_{ok}}{P_S} - R_{tC-P} - R_{tP-CH}$$

$$R_{tCH} = \frac{150 - 50}{30} - 0,2 - 1$$

$$R_{tCH} = 2,13$$

- R_{tCH} – tepelný odpor chladiča
- R_{tC-P} – tepelný odpor prechodu čip-puzdro
- R_{tP-CH} – tepelný odpor prechodu puzdro-chladič
- t_{cMAX} – maximálna teplota čipu
- t_{ok} – teplota okolia
- P_S – stratový výkon

Tepelný odpor považujeme v tomto prípade za nepriaznivý parameter, takže vypočítaný odpor budeme brať ako hornú hranicu pre hľadaný chladič. Vybraný bol chladič z hliníkového profilu s označením CHL255A/60 s tepelným odporom 1,8 °C/W a rozmermi 90x60x25 mm kde 25 mm je výška rebier chladiča.

3.4.2 TOP261EN

Z datasheetu pre chip sme odčítali hodnoty potrebné pre výpočet :

Tab. 6 Tepelné parametre obvodu TOP261EN

Parameter	Hodnota
Maximálny prúd obvodom	2,8A
Odpor zopnutého kanálu tranzistoru	1,8Ω
Tepelný odpor čip - puzdro	2°C/W
Maximálna teplota čipu	150°C

Z odporu kanálu a prúdu obvodom vieme určiť stratový výkon čipu :

$$P_S = I^2 \cdot R_{DS} = 2,8^2 \cdot 1,8 = 14,11 \text{ W}$$

$$R_{tCH} = \frac{t_{cMAX} - t_{ok}}{P_S} - R_{tC-P} - R_{tP-CH}$$

$$R_{tCH} = \frac{150 - 50}{14,11} - 2 - 1$$

$$R_{tCH} = 4,09$$

Vybraný bol chladič z hliníkového profilu s označením SK 48 50 SA s tepelným odporom 2,8 °C/W a rozmermi 65x50x20 mm.

3.4.2 BYV32-200

Z datasheetu pre chip sme odčítali hodnoty potrebné pre výpočet :

Tab. 7 Tepelné parametre diódy BYV32-200

Parameter	Hodnota
Maximálny prúd diódou	10,4A
Prahové napätie diódy	1V
Tepelný odpor čip - puzdro	1,6°C/W
Maximálna teplota čipu	150°C

$$P_S = I \cdot U_P = 10,4 \cdot 1 = 10,4 \text{ W}$$

$$R_{tCH} = \frac{t_{cMAX} - t_{ok}}{P_S} - R_{tC-P} - R_{tP-CH}$$

$$R_{tCH} = \frac{150 - 50}{10,4} - 1,6 - 1$$

$$R_{tCH} = 7,02$$

Vybraný bol chladič z hliníkového profilu s označením WSW V6560X s tepelným odporom 7 °C/W a rozmermi 37,5x29x12 mm.

3.5 Grafické zobrazenie

Pre grafické zobrazenie vybudenia predzosilovača a možných porúch vzniknutých na koncovom stupni bol vybraný dvoj riadkový display, pripojený na mikrokontrolér ATmega328p naprogramovaný vo free softwari Arduino IDE. Display bude v normálnom režime zobrazovať v jednom riadku vybudenie kanálu L a v druhom riadku vybudenie kanálu R, toto zobrazenie je založené na jednoduchom A/D prevode a prepočte na dostupný rozsah. V prípade, že by nastala chyba, program bude mať prioritu vo vypísaní príslušného erroru pred ďalším zobrazením vybudenia.

Na zobrazenie samotného vybudenia bolo potreba vytvoriť vlastné znaky ktoré rozdelia jednotlivé polia na úrovne po pixeloch. Pri výskyte chyby display vypíše : ERROR X. X značí číslo chyby od 1 po 5 zoradených podľa tabuľky 2 v kapitole 3.2.

```
byte b1[8] = { byte b2[8] = { byte b3[8] = { byte b4[8] = { byte b5[8] = {
    B10000,      B11000,      B11100,      B11110,      B11111,
    B10000,      B11000,      B11100,      B11110,      B11111,
    B10000,      B11000,      B11100,      B11110,      B11111,
    B10000,      B11000,      B11100,      B11110,      B11111,
    B10000,      B11000,      B11100,      B11110,      B11111,
    B10000,      B11000,      B11100,      B11110,      B11111,
    B10000,      B11000,      B11100,      B11110,      B11111,
    B10000};      B11000};      B11100};      B11110};      B11111};
```

Obr. 3.11 Znaký vytvorené pre potrebu zobrazenia vybudenia

4 KONŠTRUKCIA ZOSILOVAČA

4.1 Návrh DPS

Všetky dosky plošných spojov pre prácu boli navrhnuté v študentskej verzii programu EAGLE 9.3.0 . Predlohy plošných spojov a zoznamy súčiastok sú uvedené v prílohe. Pre návrh boli vo väčšine prípadov použité klasické ľahko dostupné puzdrá. U špeciálnych súčiastok a súčiastkach na mieru boli puzdrá buď vytvorené alebo dohľadane na stránkach výrobcu. Pri návrhu boli dodržané všetky odporúčania výrobcov aj normy dané školskou dielňou. Dosky sú na skriňu pripevnené pomocou dištančných kolíkov o výške 7mm. Technickú dokumentáciu k navrhnutým doskám nájdeme v prílohách A-C.

DPS predzosilovača spolu so zapojením zobrazovacích prvkov sú navrhnuté na obojstrannej prekovenej doske s rozmermi 117x73 mm. Na doske je umiestnených 10 konektorov. Konektor pre napájanie, audio vstup a výstup sú realizované pomocou konektorov so zámkom. Zvyšne sú z kolíkových líšt s počtom pinov podľa potreby od 2 až po 16. Väčšina súčiastok je volená vo vývodovom prevedení až na pár kondenzátorov a oscilačného kryštálu potrebných pre mikrokontrolér.

Plošný spoj výkonového stupňa je navrhnutý taktiež na obojstrannej prekovenej doske s rozmermi 172x143mm. Jedná sa o najväčšiu dosku z celého zariadenia aj napriek tomu že väčšina súčiastok bola použitá vo forme SMD. Na dosku je z napájacej jednotky privedené napájacie napätie 30V kvôli prúdovému zaťaženiu pomocou FAST-ON konektorov ktoré sú taktiež použité pre výstup audio signálu cez pravý a ľavý kanál z dosky. Privedenie vstupného signálu upraveného v predzosilovači je zabezpečené formou pinového konektoru so zámkom. Z dosky sa taktiež odvádzajú signály zo šiestich pinov chipu ktoré hlásia výskyt závad spomenutých v Tab.2 na dosku so zapojením grafického zobrazenia. Blokovacie kondenzátory C42 až C45 by mali byť umiestnené čo najbližšie k chipu TAS5630B, to je však obmedzené chladičom potrebným pre chladenie samotného chipu. Chladič je na chip priložený cez vrstvu teplo-vodivej pasty pre zlepšenie spoja s nim a na dosku je pripevnený dvoma šrúbami a kovovej podložky. Na doske sú umiestnené taktiež signalizačné prvky v podobe dvoch LED diód ktoré boli používané na indikáciu prípadných závad počas merania na doske.

Pre zapojenie spínaného zdroja postačila jednostranná doska s rozmermi 186x83 mm. Cesty na doske sú použité s väčším priemerom z dôvodu veľkého zaťaženia. Nastavovacie a blokovacie prvky pre riadiaci obvod TOPSwitch sú uložené čo najbližšie k potrebným pinom chipu. Napätie zo siete je na dosku privedené cez odrušovací filter, umiestnený na skriňu zosilovača, pomocou svorkovnice ARK500/2. Na 30V výstup sú použité FAST-ON konektory a na 12V výstup je použitý dvoj-pinový konektor so zámkom. Transformátor aj tlmivka použitá pre výstup 30V boli vyrobené na mieru a ich značky boli vytvorené v designery od EAGLU. Na dosku sú pripevnené taktiež dva

chladiče potrebné na chladenie riadiaceho obvodu TOPSwitch a diódy BYV32/200 na 30V výstupe.

Jednotlivé dosky sú prepojené prepojovacími káblami s prirobenými konektormi na kolíkovú lištu prípadne FAST-ON konektormi.

4.2 Prístrojová skriňa

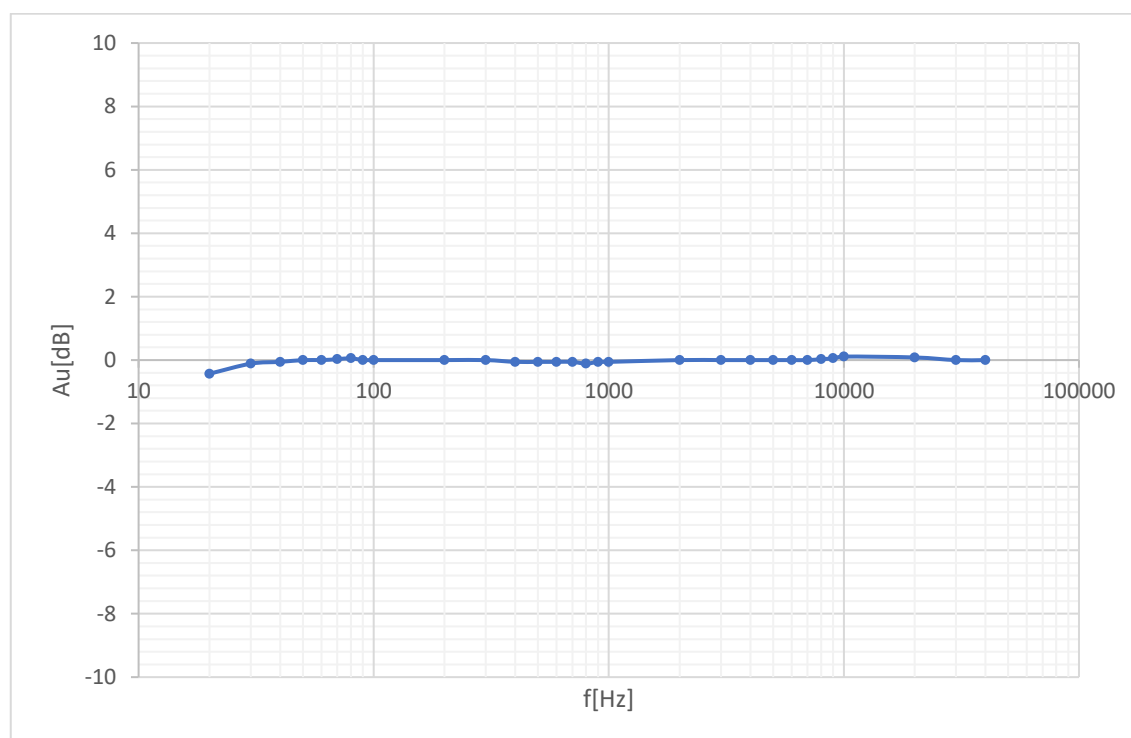
Celé zariadenie je uložené v kovovej skrini, nakoľko zosilovač obsahuje spínané prvky ktoré treba zabezpečiť od šírenia rušenia do okolitého prostredia. Skriňa je zhotovená z plechu o hrúbke 0,8mm s vonkajšími rozmermi 320x200x80mm. Skriňa bola vystrihnutá CNC strojom do požadovaného tvaru a otvormi nekrhového tvaru a následne ohnutá na ohýbačke plechu. Pre zjemnenie hrán bola celá skriňa poplastovaná. Na vrchnej strane je séria otvorov pre zlepšenie toku vzduchu vo vnútri zariadenia a tak zlepšeniu jeho chladenia. Z prednej strany je otvor o veľkosti 72x20mm do ktorého je umiestnený display a 4 kruhové otvory na ktoré sú upevnené potenciometre. Na zadnej strane skrine sú 4 konektory pre vstup a 4 konektory pre výstup, okrem nich je na zadnej strane zvnútra skrine umiestnený odrušovací filter prichytený dvoma šrúbami. Do zariadenia je vedené sieťové napätie cez kábel vedený kruhovým otvorom o priemere 10mm. Ochranný vodič je spojený so skriňou cez odrušovací filter. Nákres pre vystrihnutie skrine nájdeme v prílohe D.

5 VÝSLEDKY MERANIA

Kvalitu celého zostaveného zosilovača ako aj jeho jednotlivých blokov môžeme posúdiť z nameraných hodnôt ktoré porovnáme s údajmi udávanými výrobcami nami zvolených súčiastok. Pri posudzovaní kvality zosilovačov sa pozerá predovšetkým na skreslenie THD+N, výstupný výkon P_{OUT} , prenášanú šírku pásma, vstupný a výstupný odpor R_{IN} a R_{OUT} a taktiež účinnosť η .

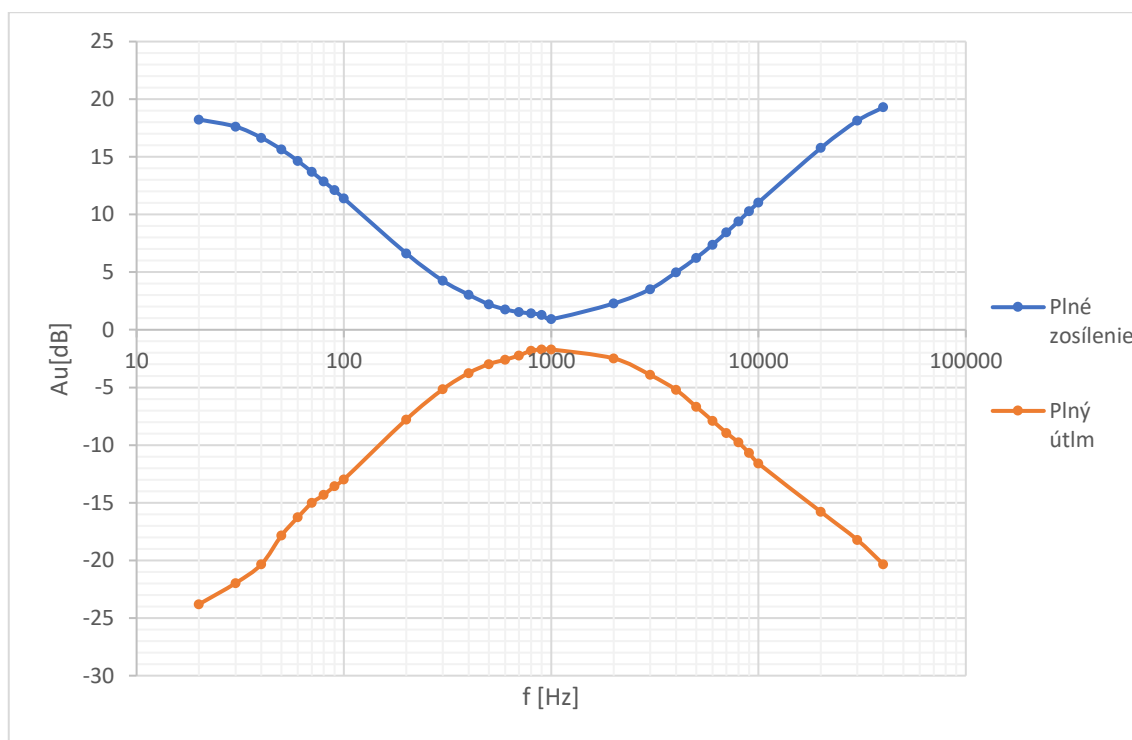
5.1 Korekčný predzosilovač

Na obrázku 5.1 vidíme frekvenčnú modulovú charakteristiku korekčného predzosilovača ktorá bola meraná na vstupnom napätí Peak to Peak $U_{IN} = 300$ mV. Približne v strede charakteristiky na frekvencii 1kHz bolo na predzosilovači pomocou potenciometru na nastavenie hlasitosti nastavené zosílenie 0dB. Zvyšne potenciometre ostali vo svojich stredových polohách. Ako môžeme vidieť zosilovač si drží konštantné zosílenie od 40Hz až po 40kHz. Z toho môžeme posúdiť, že zosilovač nám nebude ovplyvňovať audio pásmo ktoré zaberá 20Hz – 20kHz. Od frekvencie 30Hz pozorujeme jemný pokles ktorý by však bol pri ešte nižších frekvenciách podstatne strmší kvôli vstupným kondenzátorom ktorých úlohou je potlačiť jednosmernú zložku.



Obr. 5.1 Frekvenčná modulová charakteristika korekčného predzosilovača

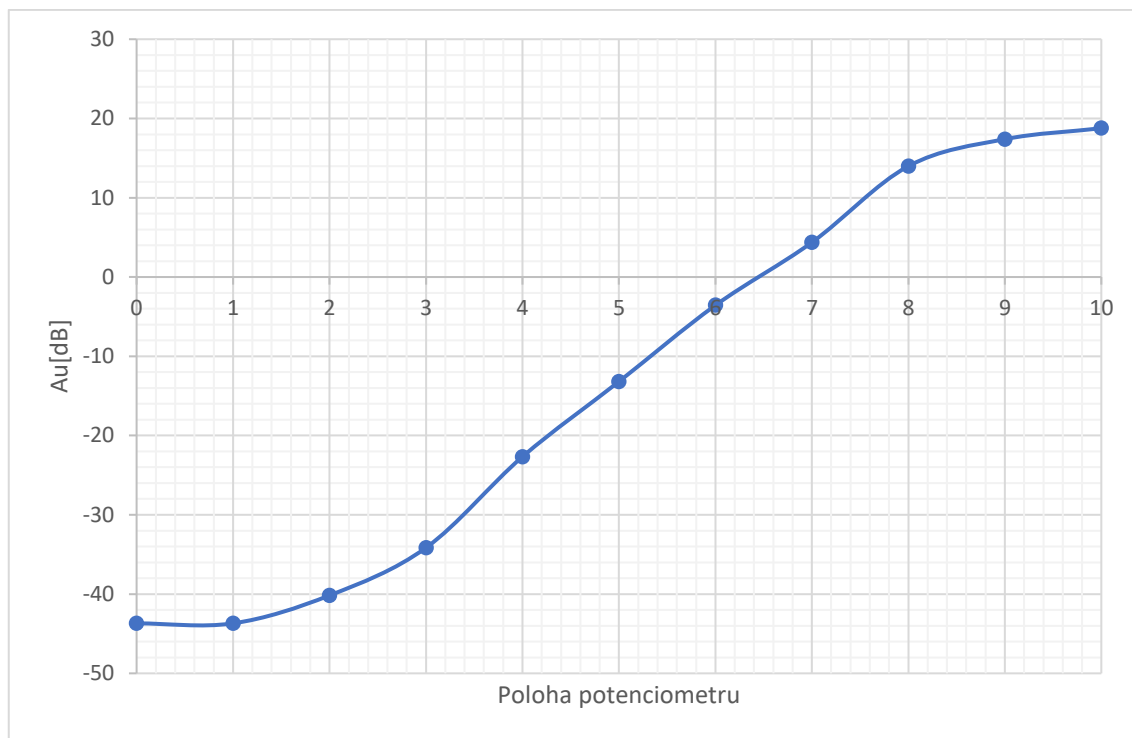
Obrázok 5.2 nám zobrazuje frekvenčnú modulovú charakteristiku pre nastavenie zosílenia resp. útlmu basov na maximálnu možnú úroveň. Meranie prebehlo opäť pri vstupnom napätí Peak to Peak $U_{IN} = 300$ mV. Vidíme, že korekcie nám dokážu hĺbky aj výšky zosilieť prípadne zoslabiť až o 20dB.



Obr. 5.2 Frekvenčná modulová charakteristika maximálnych korekcií

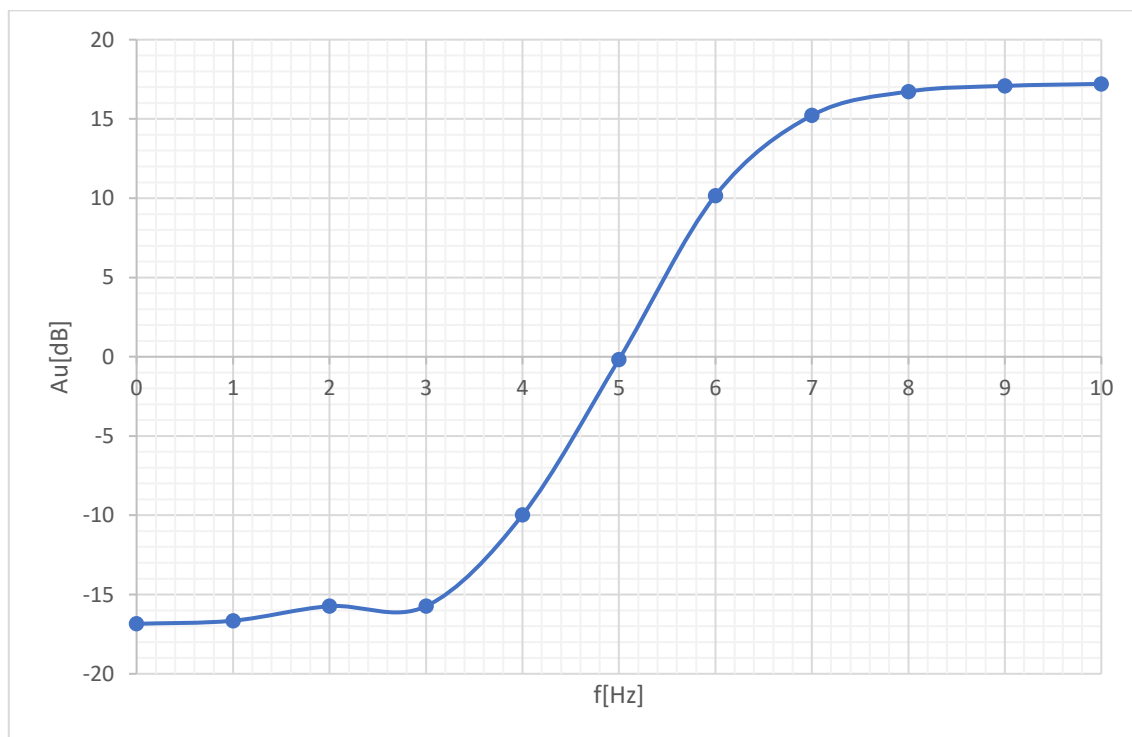
Na obrázkoch 5.3 až 5.6 vidíme o vplyv polohy jednotlivých korekčných potenciometrov na zosílenie signálu.

Obrázok 5.3 nám zobrazuje nastavenie potenciometru hlasitosti ktoré nám určuje zosílenie na polohe potenciometru. Korekčný predzosilovač nám podľa grafu dovoľuje regulovať zosílenie od -44dB po 19dB. Nastavenie nulového zosílenia sa nachádza niekde medzi 6. a 7. polohou. Meranie prebiehalo na frekvencii 1kHz a vstupnom napätí $U_{IN} = 300$ mV Peak to Peak.



Obr. 5.3 Závislosť zosílenia predzosilovača na polohe Volume potenciometra

Na obrázkoch 5.4 a 5.5 sú zobrazené nastavenia Bass a Treble ktoré boli merané na frekvencii 50Hz pre nastavenie Bass a 15kHz pre nastavenie Treble.

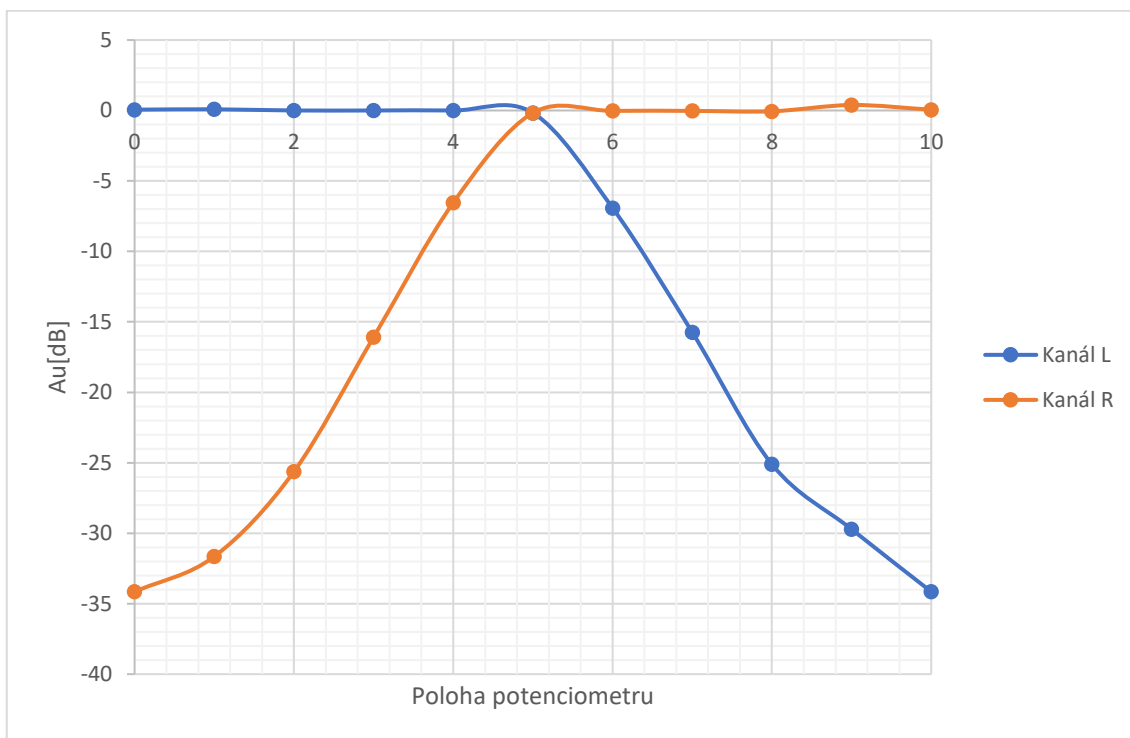


Obr. 5.4 Závislosť zosílenia predzosilovača na polohe Bass potenciometru



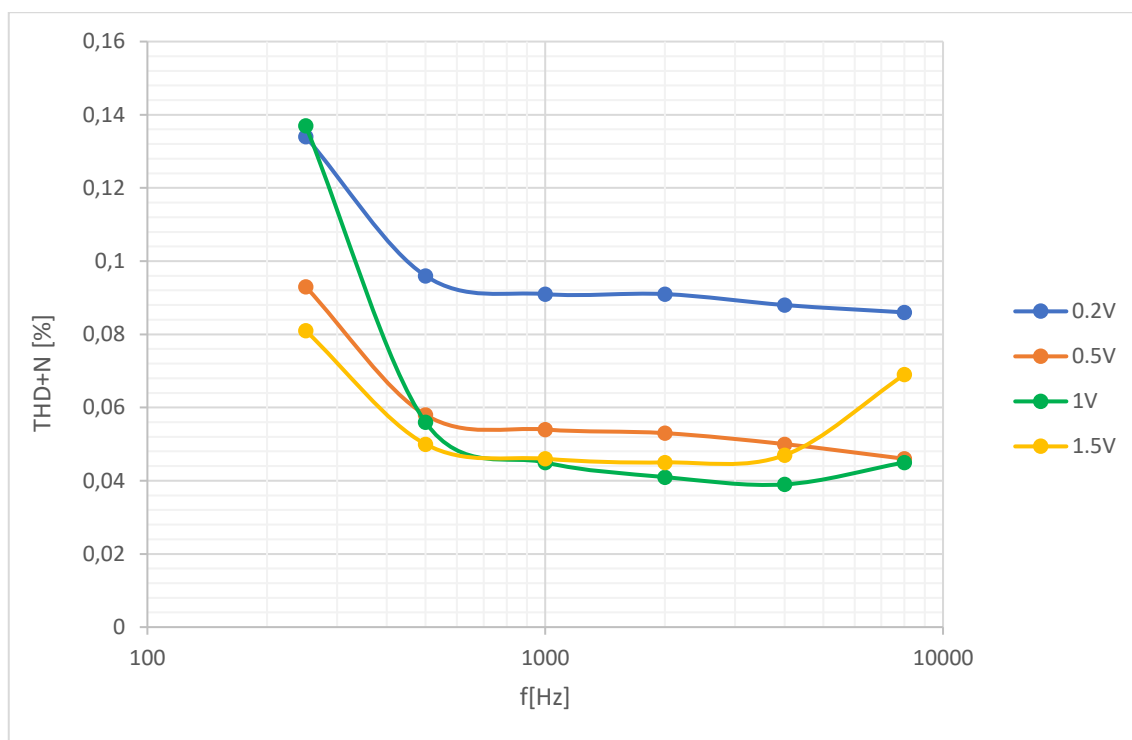
Obr. 5.5 Závislosť zosilnenia predzosilovača na polohe Treble potenciometru

Obrázok 5.6 zobrazuje graf pre útlm pravého a ľavého kanálu podľa nastavenia potenciometru na Balance. Ako môžeme vidieť v strednej polohe nám oba kanály prenášajú bez útlmu a v krajných polohách dokážeme jednotlivé kanály stlmiť až o 34 dB.



Obr. 5.6 Závislosť útlmu kanálu L a R na polohe Balance potenciometru

Pomocou milivoltmetru GRUNDIG MV100 bolo na predzosilovači zmerané skreslenie THD+N ktoré vidíme na obrázku 5.7. Skreslenie bolo merané na rôznych amplitúdach signálu od 0,2V do 1,5V Peak to Peak. Meranie v rozpätí len 200Hz až 8kHz keďže prístroj meria len v tomto rozpätí. Vidíme, že skreslenie sa celkovo drží na veľmi dobrých hodnotách. Avšak najideálnejší stav je pri privedení amplitúdy približne 0,5V kedy sa skreslenie pohybuje na 0,04%.



Obr. 5.7 Závislosť skreslenia THD+N na frekvencii signálu rôznej amplitúdy

Pri zosílení 0 dB bolo pre predzosilovač taktiež, metódou vloženého cejchovaného odporu, zmeraný vstupný odpor ktorý je značne závislý na zosílení. Vstupný odpor vyšiel 81 kΩ pre približnom nastavením zosílenia 0 dB, čo odpovedá údajom udávajúcim výrobcom.

V tabuľke 8 máme porovnanie katalógových a dosiahnutých parametrov podstatných pre náš predzosilovač. Potešením je polovičná hodnota skreslenia pri ideálnej amplitúde signálu. Sklamaním je naopak takmer polovičná regulácia hlasitosti. Nastavenie by malo zaostávať predovšetkým v oblasti útlmu kde boli očakávané hodnoty okolo -80 dB. Dosiahnutý útlm bol -44 dB. Inak môžeme považovať dosiahnuté parametre za takmer totožne s parametrami od výrobcu

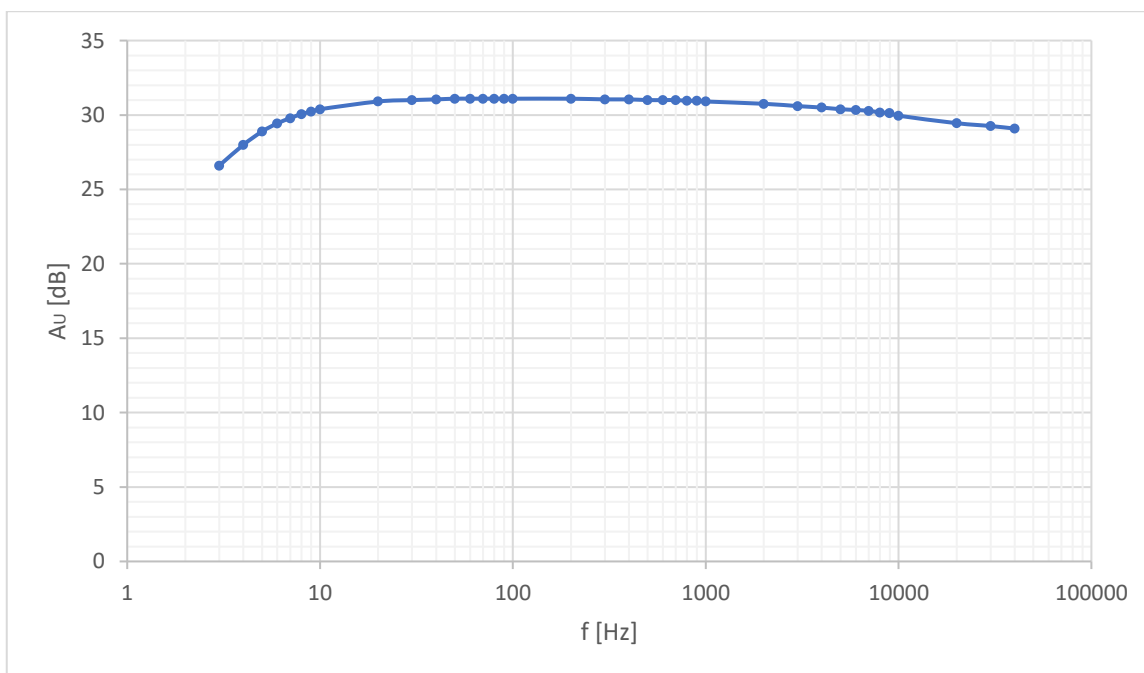
Tab. 8 Porovnanie katalogových parametrov s dosiahnutými (predzosilovač)

Parameter	Katalógová hodnota	Nameraná honota	Jednotka
Vstupný odpor	80	81	k Ω
Maximálne zosílenie	23	19	dB
Rozsah regulácie hlasitosti	100	63	dB
Rozsah korekcie Bass (50Hz)	36	34	dB
Rozsah korekcie Treble (15kHz)	30	29	dB
Potlačenie kanálu	-40	-34	dB
THD+N ($U_{IN}=1V$, $f=1kHz$, $A=0dB$)	0,1	0,045	%

5.1 Výkonový stupeň

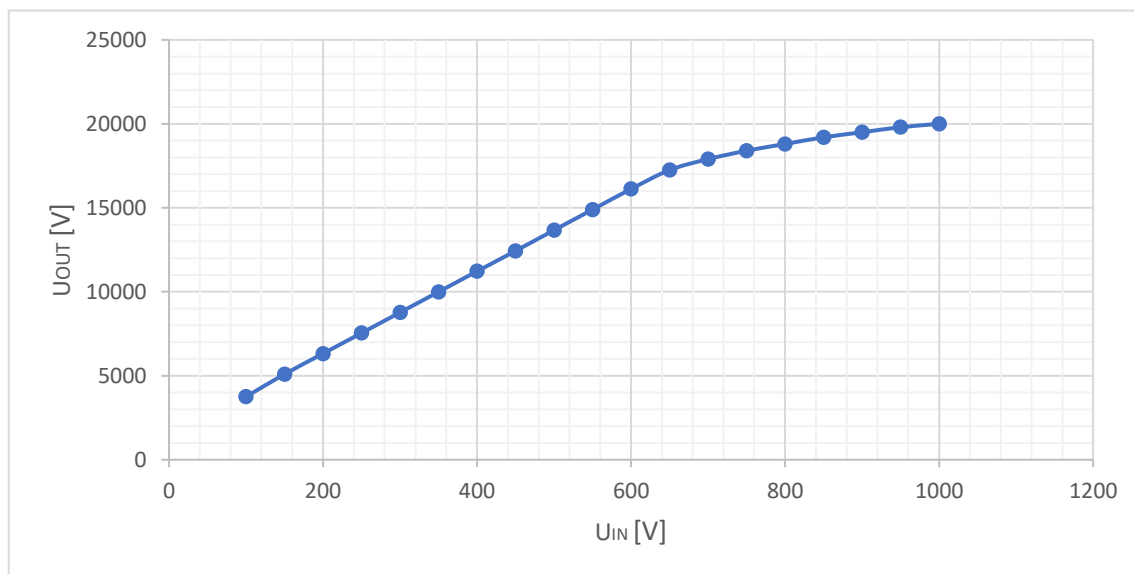
Pre meranie koncového stupňa zosilovača bola použitá elektronická záťaž nastavená pre na navrhované 4 Ω . Pri meraní zosílenia zohľadňujeme diferenčné predzosilovače ktoré majú vlastné zosílenie udávané výrobcom 7 dB. U koncového stupňa sme premeriavali zosílenie závisle na frekvencii, účinnosť, linearitu a skreslenie závisle na výkone a frekvencii.

Na obrázku 5.8 vidíme modulovú frekvenčnú charakteristiku koncového stupňa. Zosílenie sa nám v celom spektre audio frekvencií (20 Hz až 20 kHz) drží na 31 dB čo nám po odrátaní zosílenia na predzosilovači 7 dB dá 24 dB čo je približná hodnota udávaná výrobcom dokonca o decibel vyššia. Meranie prebehlo pri vstupnom napätí 300 mV čo zodpovedá približne 20 W výkonu.



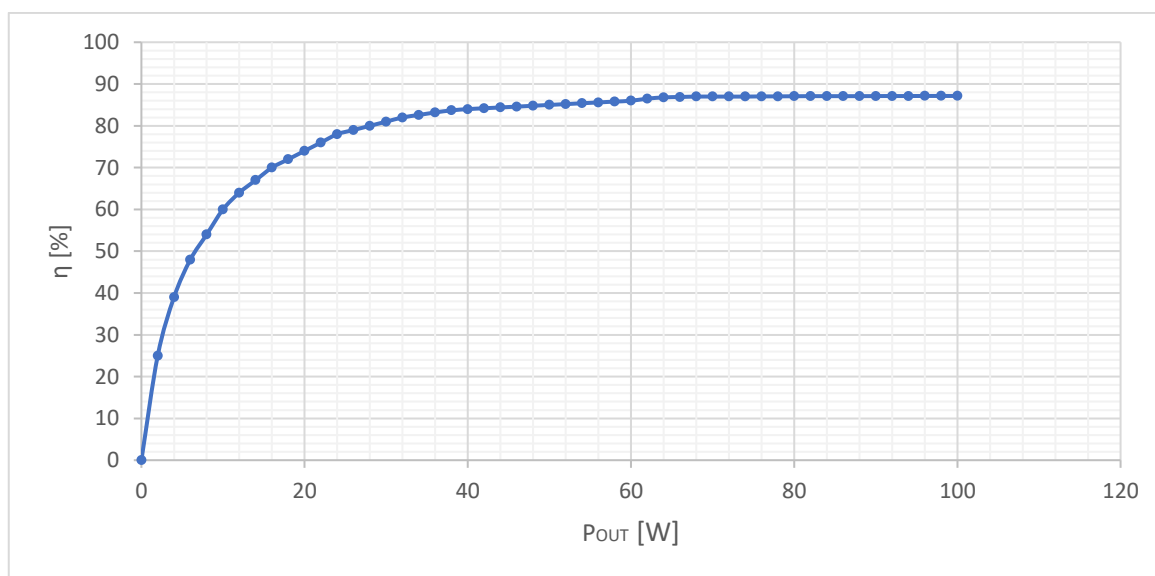
Obr. 5.8 Frekvenčná modulová charakteristika výkonového stupňa

Obrázok 5.9 nám ukazuje linearitu navrhnutého koncového stupňa. Linearita končí na približne 650 mV na vstupe kde začíname pozorovať skreslenie. Tento bod zlomu sa nachádza na približných 74 W výkone. Celá charakteristika bola meraná pri frekvencii 1 kHz.



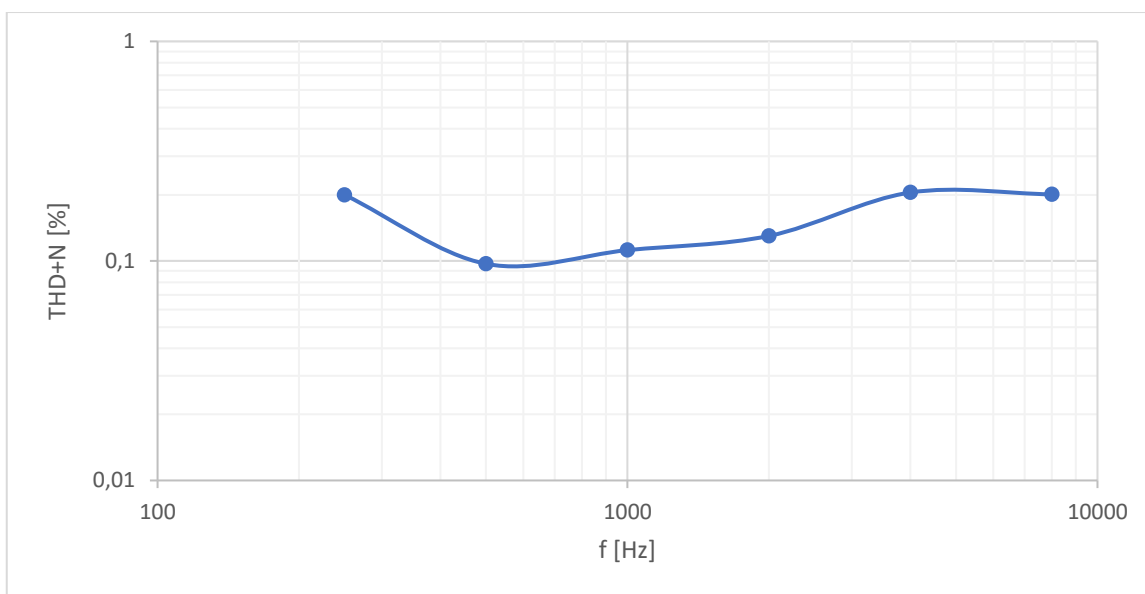
Obr. 5.9 Linearita zosílenia koncového stupňa

V grafe na obrázku 5.10 môžeme vidieť vyvíjajúcu sa závislosť účinnosti na výstupnom napätí zosilovača. Účinnosť vypočítame ako podiel výstupného výkonu k celkovému príkonu koncového stupňa. Výstupný výkon si vieme určiť z napätia na výstupe a odporu zapojenej záťaže a príkon bol počítaný ako násobok napájacieho napätia (v našom prípade konštantných 30 V) a prúdu ktorý nám celé zariadenie odoberalo. Výrobca udáva účinnosť pri plnom výkone 85 %, nám sa podarilo dostať na 87 %.

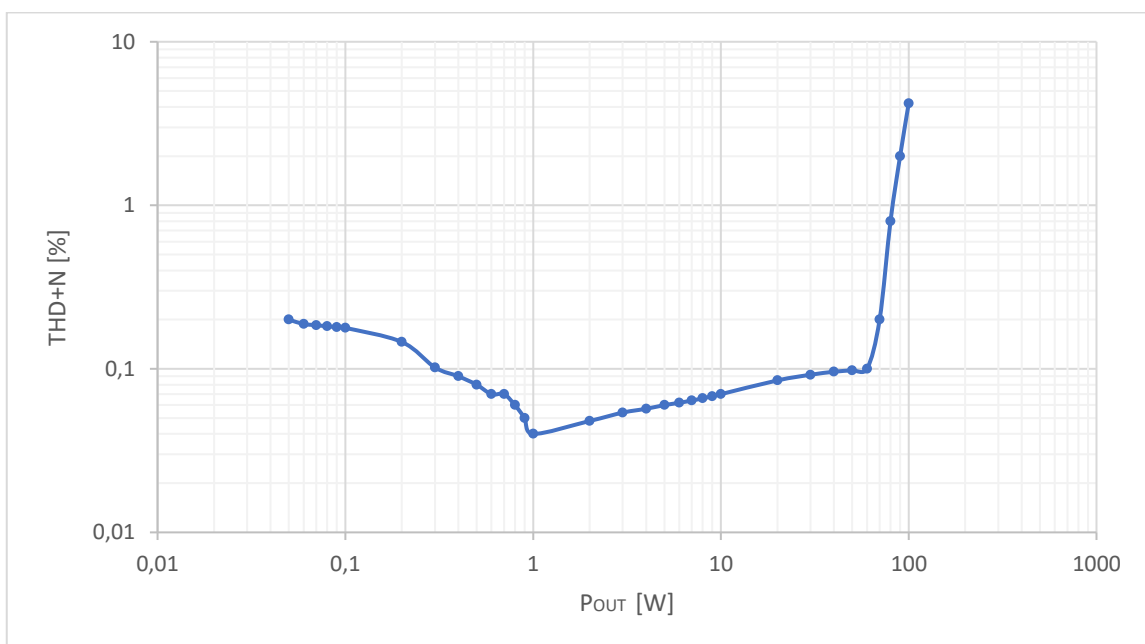


Obr. 5.10 Účinnosť závislá na výstupnom výkone

Závislosti skreslenia THD+N nám zobrazujú grafy na obrázkoch 5.11 a 5.12. Na obrázku 5.11 je závislosť skreslenia na frekvencií vstupného signálu s amplitúdou 0,3 V, ktoré bolo merané rovnako ako skreslenie merané na predzosilovači milivoltmetrom GRUNDIG MV100 ktorý umožňuje merať len v rozsahu 250 Hz až 8 kHz a tak graf nesiahá mimo toto pásmo. Závislosť meraná na základe výstupného výkonu bola meraná na jednotnej frekvencii 1 kHz. Skreslenie na koncovom stupni sa nám v závislosti na frekvencií pohybuje v rozpätí 0,1 %. Závislosť na výkone je takmer konštantná, až po výkon 70-80 W kde nám skreslenie stúpne na 1 % a pri maximálnom výstupnom výkone dosahuje 5,8 %.



Obr. 5.11 Skreslenie v závislosti na frekvencií



Obr. 5.12 Skreslenie v závislosti na výkone

Vstupný odpor meraný metódou vloženého cejchovaného odporu bol nameraný o veľkosti 12 k Ω . Táto hodnota sa môže líšiť od údajov od výrobcu hlavne kvôli momentálnemu zosíleniu. V tabuľke 9 nájdeme porovnanie dosiahnutých parametrov s katalógovými. Skreslenie by podľa údajov odporúčaných výrobcom bolo možné dosiahnuť použitím vyššieho napájacieho napätia, keďže chip pracuje na širšom rozpätí vstupného napätia.

Tab. 9 Porovnanie katalogových parametrov s dosiahnutými (koncový stupeň)

Parameter	Katalógová hodnota	Nameraná hodnota	Jednotka
Vstupný odpor	33	12	k Ω
Maximálne zosílenie	23	24	dB
Účinnosť ($P_{OUT} = 100W$)	85	89	%
THD+N ($P_{OUT}=1W$, $f=1kHz$, $R_Z=4\Omega$)	0,03	0,04	%
THD+N ($P_{OUT}=100W$, $f=1kHz$, $R_Z=4\Omega$)	0,09	4,2	%
$P_{OUT}(R_Z=4\Omega, THD+N = 1\%)$	240	85	W

6 ZÁVER

Cieľom bakalárskej práce bolo zoznámiť sa so spínanými triedami výkonových zosilovačov a navrhnúť audio zesilovač v spínanej triede D s výstupným výkonom 2x100W, ktorý bude ako zariadenie rozšírený o korekčný predzosilovač s možnosťou nastavenia hlasitosti, balance a frekvenčnej charakteristiky s vlastným napájacím zdrojom. Ako prvé som sa zoznámili s audio zosilovačmi v spínaných triedach, s funkciami modulátoru, budiča a výkonových tranzistorov. Po pochopení problematiky boli vybraté integrované obvody za pomoci ktorých majú byť jednotlivé bloky konštruované.

Z odporúčaní a predošlých skúseností bol pre korekciu audio signálu vybraný riadiaci obvod TDA1524. Relatívne jednoduché zapojenie je spolu so zapojením mikrokontroléru ATmega328p na jednej doske. Podľa zmeraných charakteristík je zrejme že zapojenie pracuje spoľahlivo a bez väčších obmedzení podľa parametrov udávaných výrobcom. Korekčné nastavenia sú cez štyri potenciometre spolu s dvoj riadkovým LCD displayom vyvedené na predný panel zariadenia.

Pre koncový stupeň zosilovača bol vybraný integrovaný obvod od firmy Texas Instruments TAS5630B ktorý dokáže pri správnom zapojení dosiahnuť zadaný výkon 2x100 W. Pri návrhu boli použité odporúčané zapojenia výrobcu s odporúčanými návrhovými pravidlami. Zapojenie dosiahlo nad očakávania dobré výsledky čo sa týka zosílenia a účinnosti ktoré vyšli lepšie ako tie, udávané výrobcom. Horšie dopadlo skreslenie ktoré pri maximálnom výkone dosiahlo takmer päť krát väčšej hodnoty ako udáva výrobca. Tento parameter by sa však dal zlepšiť zvýšením napájacieho napätia čo by v konečnom dôsledku zvýšilo aj celkový maximálny výkon, avšak zvýšilo aj požiadavky na napájací zdroj. Výkonový stupeň je prispôbený na záťaž o veľkosti 4 Ω .

Napájacia jednotka bola zvolená v spínanej podobe s riadiacim obvodom od firmy Power Integrations rady TOPSwitch. Pre návrh bol použitý software od tejto firmy PIExpert ktorý zo zvolených požiadaviek na zdroj vyberie najefektívnejšie riešenie s možnosťou dodatočnej úpravy zapojenia so spätnou kontrolou. Napájaciu jednotku sa nepodarilo oživiť, nakoľko transformátor navrhnutý programom mi bola schopná vyrobiť jedine firma BV Electronics. Výroba trafa im zabrala 2 mesiace a po konštrukcii zdroja bola na transformátore detekovaná chyba kde podľa všetkého na primárnom vinutí došlo k rozpojeniu. Z časového hľadiska nebol čas na reklamáciu transformátoru a ďalšiemu ožiovaniu napájacej jednotky. Bloky prezosilovača a koncového stupňa tak boli merané a testované na regulovateľnom napájacom zdroji.

Celé zariadenie je umiestnené do vyrobenej celokovovej skrine so štyrmi vstupnými a štyrmi výstupnými konektormi na zadnej strane. Konštrukcia celého zariadenia vyšla na približných 6000 Kč, kde najväčšiu položku tvorili na mieru vyrobené vinuté diely.

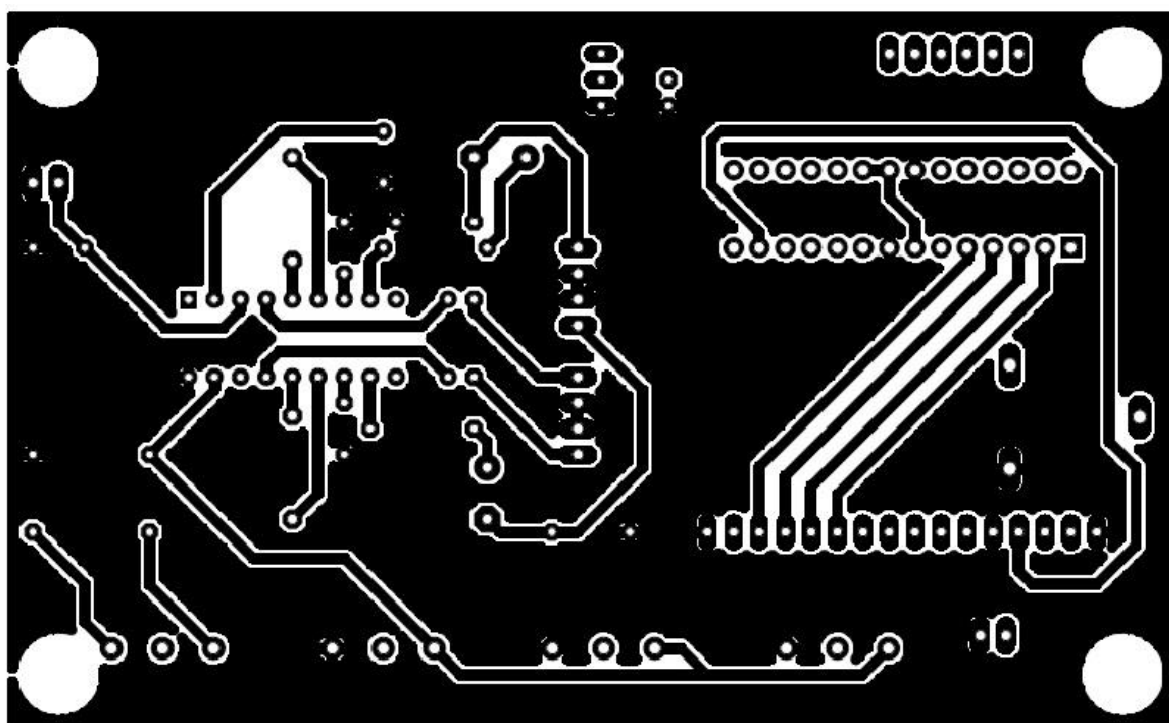
Literatura

- [1] ŠTÁL,P. Výkonové zesilovače pracující ve třídě D. Technická literatura BEN, 2008
- [2] DUŠEK, T. Pandatron, *Třídy zesilovačů* [online]. 2009 [cit. 2011-10-2]. Dostupné na WWW: <http://pandatron.cz/?632&tridy_zesilovacu>
- [3] The Class-I Amplifier ,CROWN dostupné na WWW: educypedia.karadimov.info/library/137234.pdf
- [4] Elweb, Audio zesilovače pracující ve třídě D [online],2008 Dostupné na WWW: elweb.cz/clanky.php?clanek=109
- [5] Datasheet – TDA1524, Stereo-tone/volume control circuit. Philips, 1987 [online]. Dostupný na WWW :
http://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Tda1524a%20datasheet&gclid=CjwKCAiAlvnfBRA1EiwAVOEgfGIC7mduyLzXmS_bTBgOhYznMvhGtiXMfy96iFKSNfnFjn0Vb2B9BxoCARgQAvD_BwE
- [6] Datasheet TAS 5630B, 300W stereo/600W mono PurePath™ HD analog-input power stage [online]. Texas instruments, 2010. Dostupné na WWW:
http://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Tas5630b&gclid=CjwKCAiAl7PgBRBWEiwAzFhmmlpcoqzM681eLc4nDZC-4un7JWs4Er41rgEojCugASyX1R2WxGOSHhoCh6oQAvD_BwE
- [7] Krejčířík, A. *Spínané napájecí zdroje s obvody TOPSwitch*. Praha: Technická literatura BEN, 2002. ISBN 80-7300-031-8.
- [8] Datasheet TOP261EN [online]. Dostupné na WWW:
<https://www.datasheets.com/en/datasheet/top261en-power-integrations-34941619>

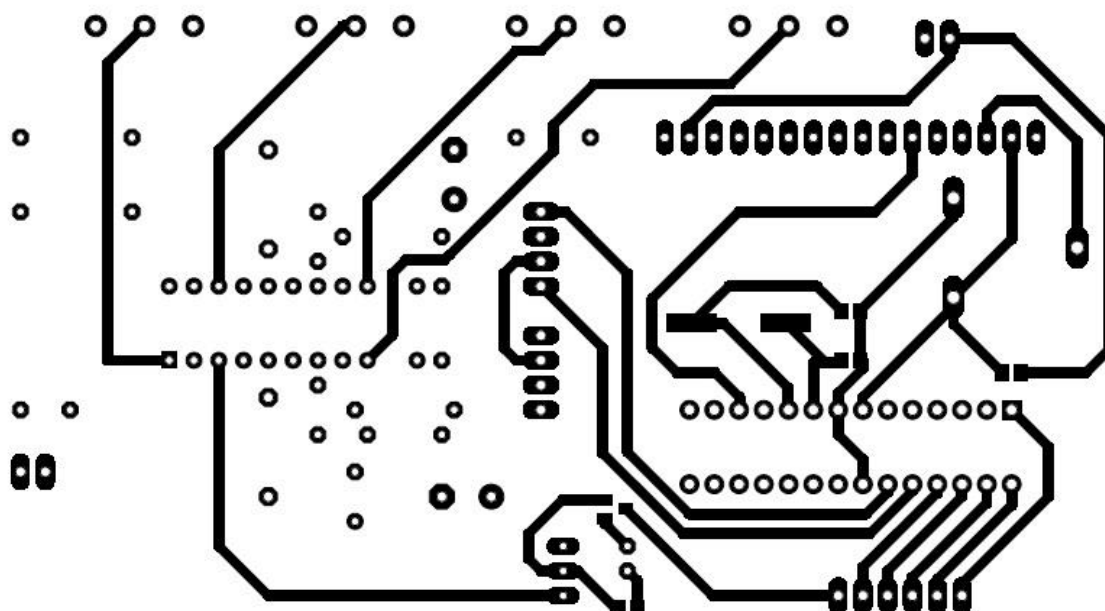
Zoznam príloh

A	DPS korekčného predzosilovača.....	45
A.1	Schéma zapojenia.....	45
A.2	DPS – strana bottom.....	46
A.3	DPS – strana top.....	46
A.4	DPS – osazovací plán.....	47
A.5	Zoznam súčiastok.....	47
B	DPS výkonového stupňa.....	48
B.1	Schéma zapojenia.....	48
B.2	DPS – strana bottom.....	49
B.3	DPS – strana top.....	50
B.4	DPS – osazovací plán.....	51
B.5	Zoznam súčiastok.....	52
C	DPS zdroja.....	53
C.1	Schéma zapojenia.....	53
C.2	DPS – strana bottom.....	54
C.3	DPS – osazovací plán.....	54
C.4	Zoznam súčiastok.....	55
D	Nákres prístrojovej skrine.....	56
E	Fotodokumentácia.....	57

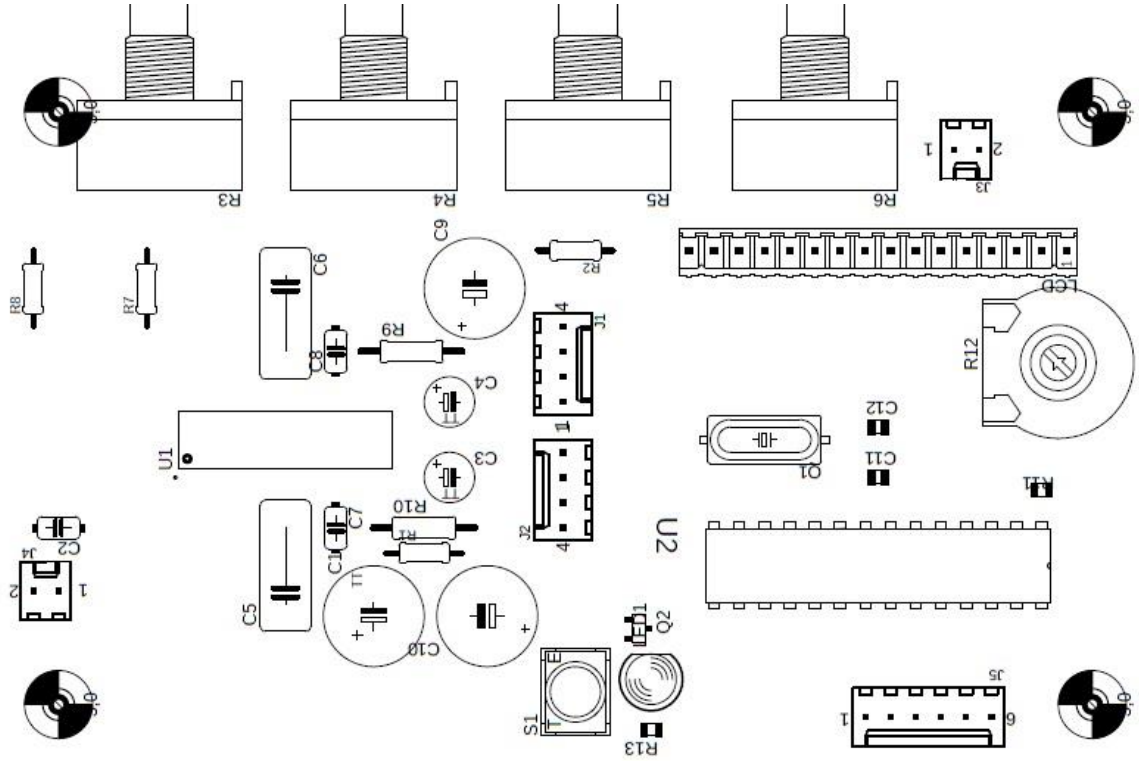
A.2 DPS – strana bottom



A.3 DPS – strana top



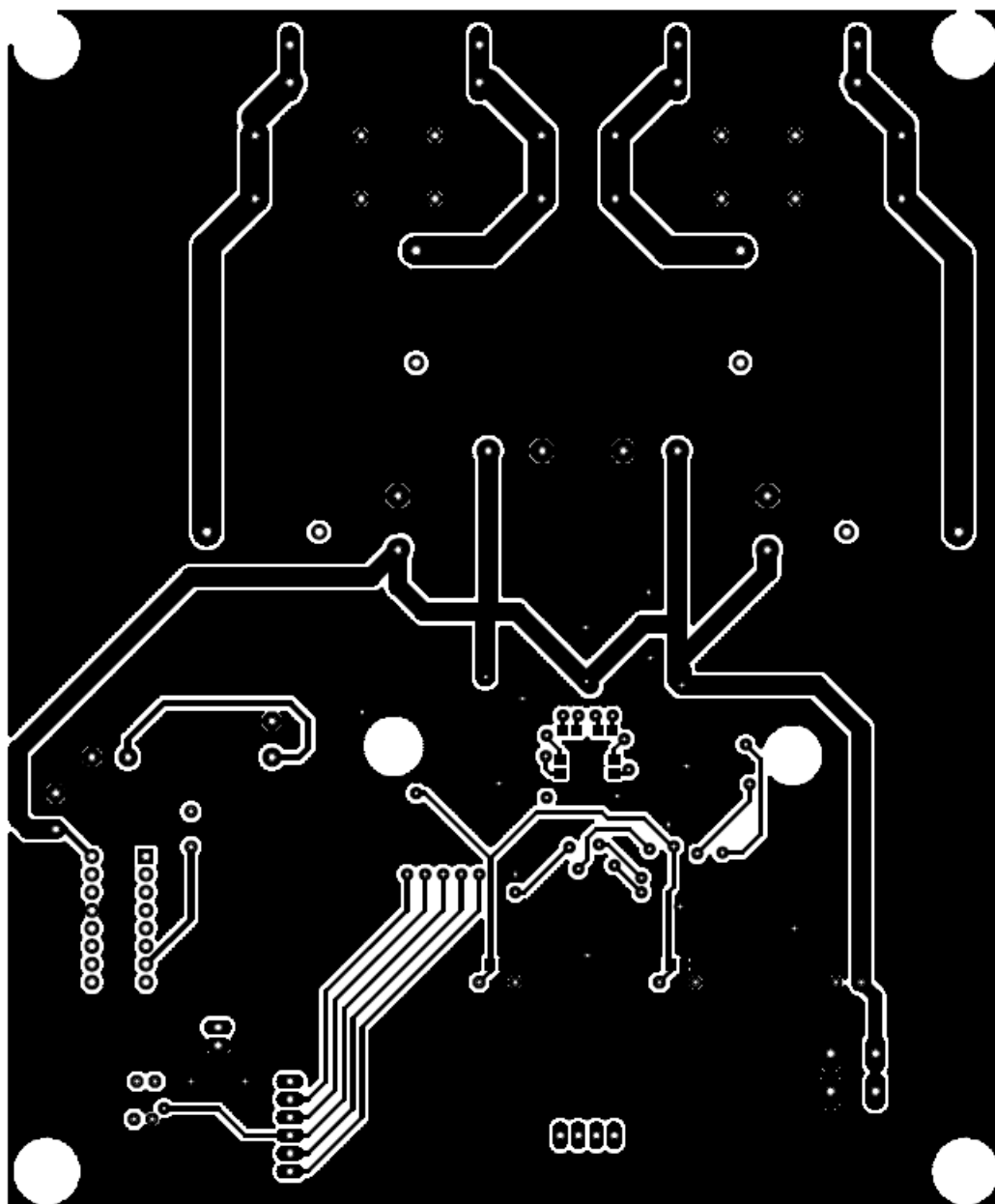
A.4 DPS – osazovací plán



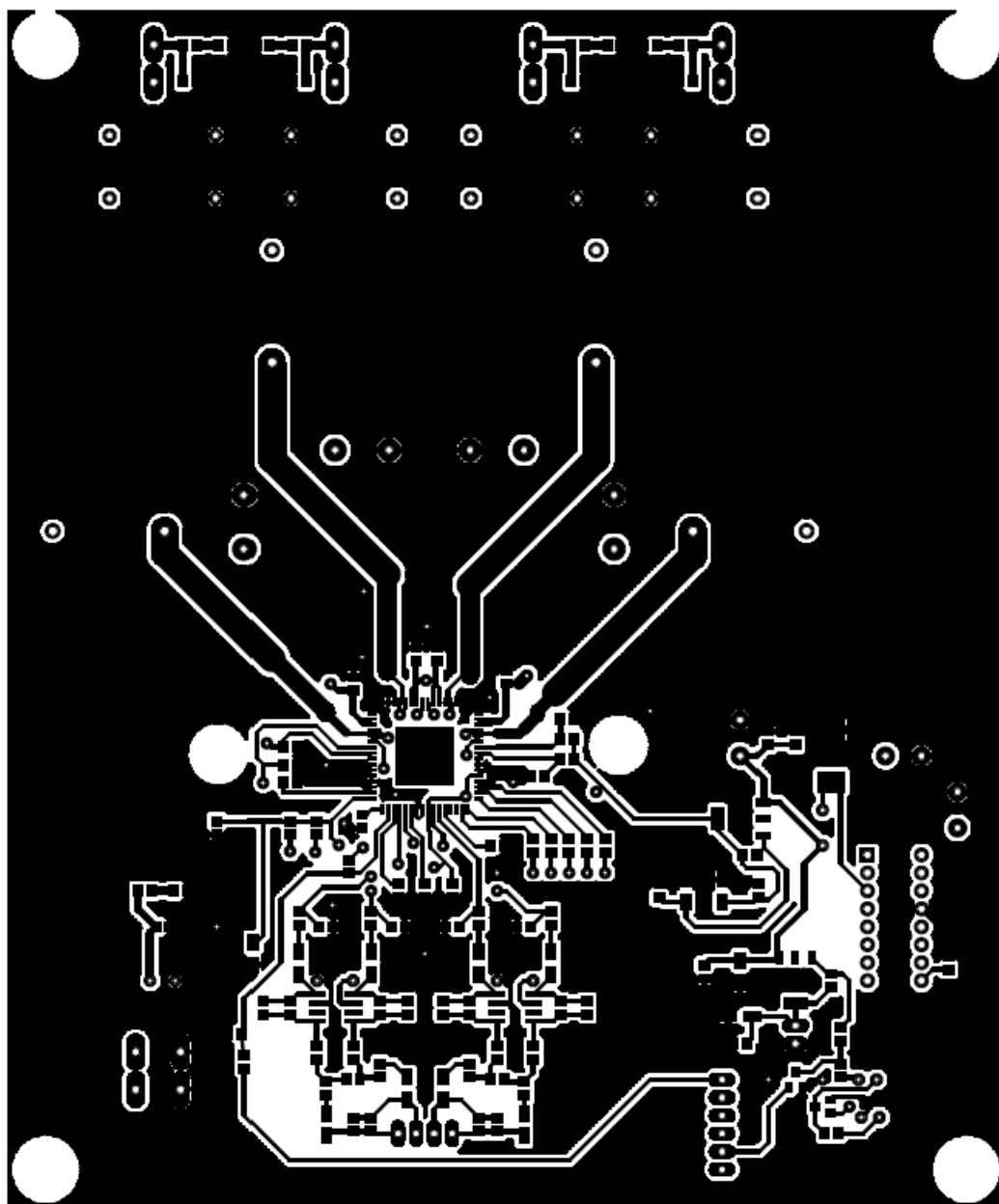
A.5 Zoznam súčiastok

Označenie	Množstvo	Hodnota	Sučiastka	Puzdro
Q1	1		CRYSTALSM49	SM49
I.O1	1		LED5MM	LED5MM
LCD J	1		M16	16P
C1	1	100u	CPOL-EUTT5D10	TT5D10
R7, R8	2	10k	R-EU_0204/7	0204/7
R12	1	10k	TRIM_EU-LI15	LI15
C7, C8	2	15n	C-EU050-024X044	C050-024X044
C3, C4	2	2,2u	CPOL-EUTT2D5	TT2D5
R9, R10	2	200	R-EU_0207/10	0207/10
J3, J4	2	22-27-2021-02	22-27-2021-02	6410-02
J1, J2	2	22-27-2041-04	22-27-2041-04	6410-04
J5	1	22-27-2061-06	22-27-2061-06	6410-06
C2	1	220n	C-EU050-024X044	C050-024X044
Q2	1	2N7002	2N7002	SOT23
R1, R2	2	4,7k	R-EU_0204/7	0204/7
C9, C10	2	4,7u	CPOL-EUE5-10.5	E5-10,5
R11	1	470	R-EU_R0805	R0805
C11, C12	2	47p	C-EUC0805	C0805
R13	1	4k7	R-EU_R0805	R0805
R3, R4, R5, R6	4	50k	3RP/1610N	3RP/1610N
C5, C6	2	56n	C-EU102-054X133	C102-054X133

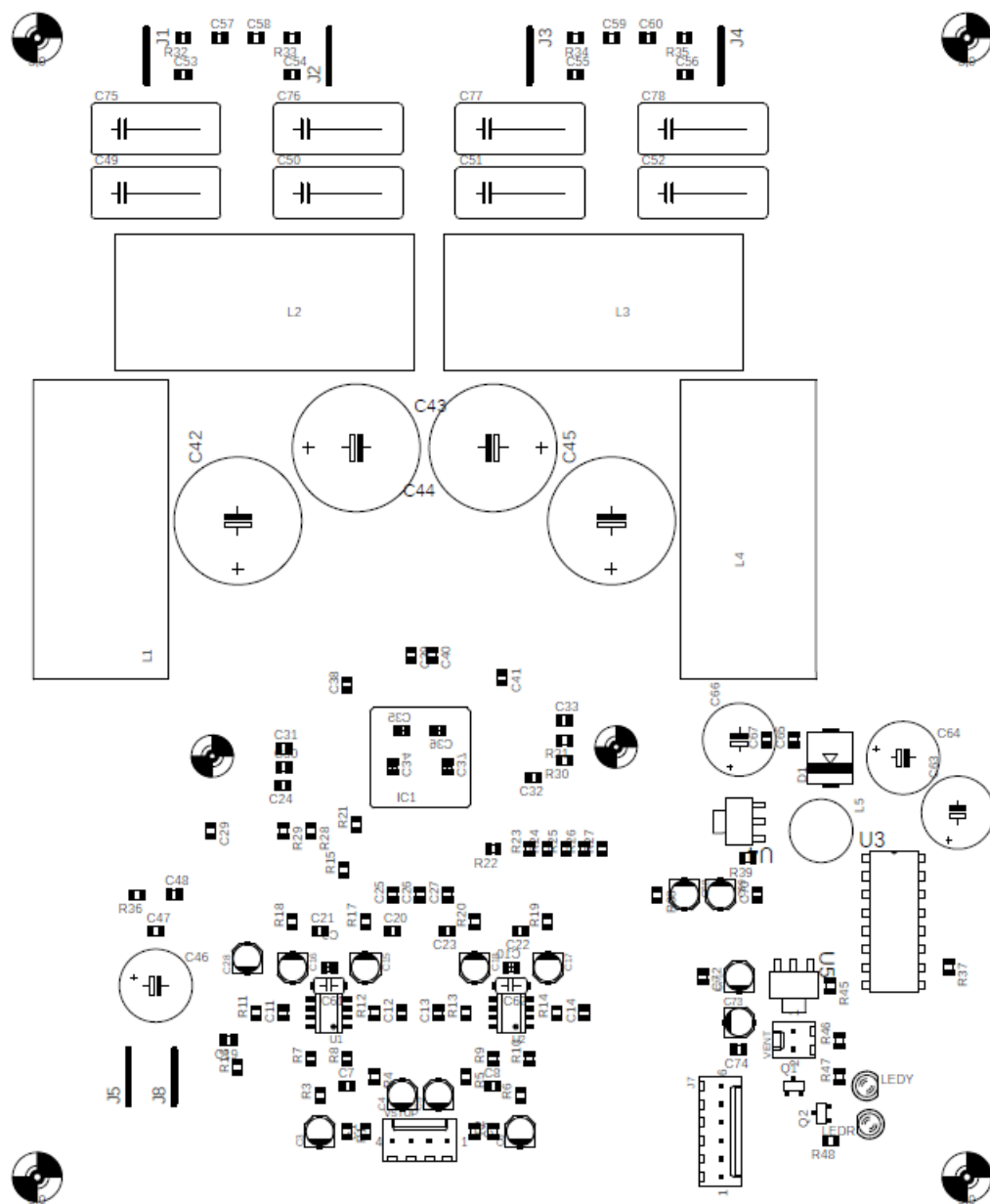
B.2 DPS – strana bottom



B.3 DPS – strana top



B.4 DPS – osazovací plán

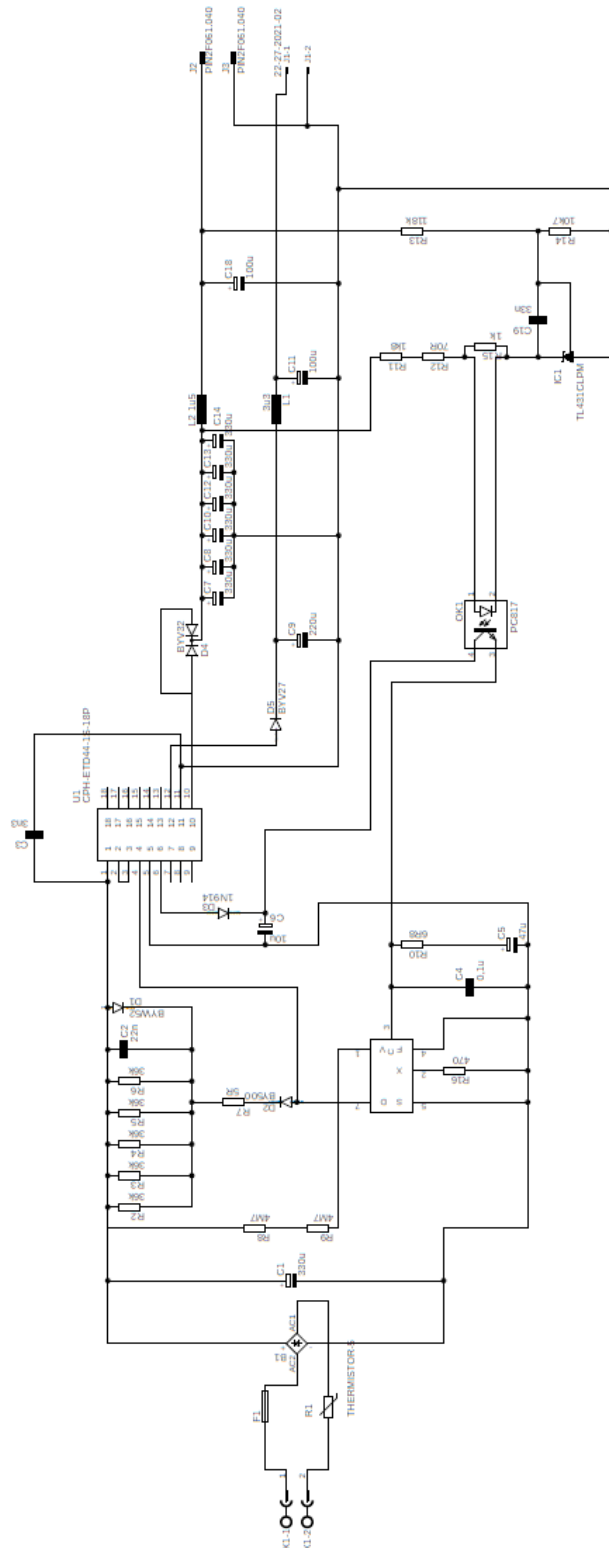


B.5 Zoznam súčiastok

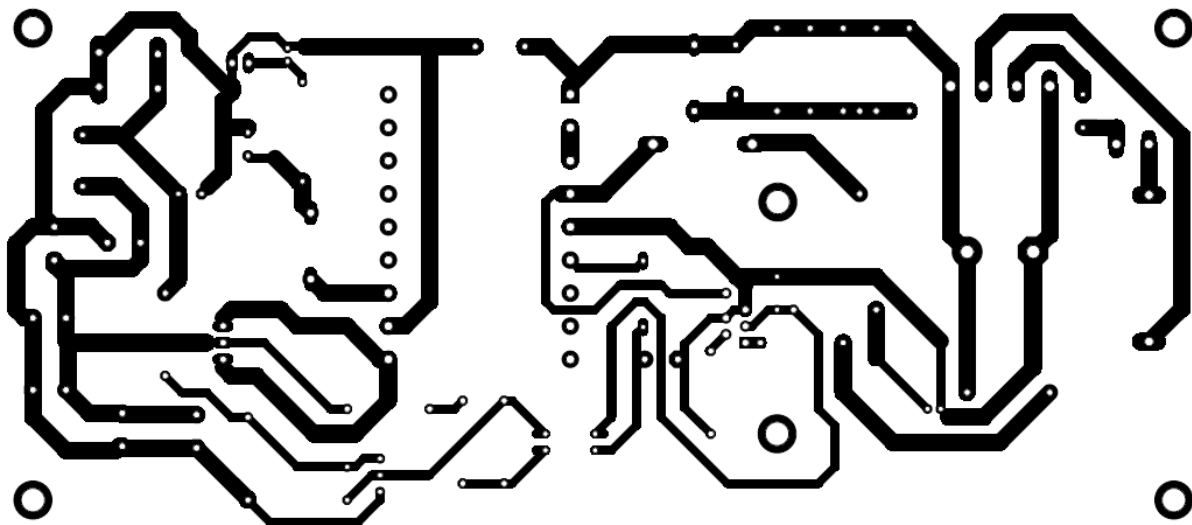
Označenie	Množstvo	Hodnota	Súčiastka	Puzdro
LEDR, LEDY	2		LED3MM	LED3MM
D1	1		SCHOTTKY-DIODESMC	SMC
C42, C43, C44, C45	4	1000u	CPOL-EUE7.5-18	E7,5-18
R16, R17, R18, R19, R20, R23, R24, R25, R26, R27	10	100R	R-EU_R0805	R0805
R1, R2	2	100k	R-EU_R0805	R0805
C9, C10, C27, C29, C30, C31, C32, C33	8	100n	C-EUC0805	C0805
C67, C70, C72, C74	4	100nF	C-EUC0805	C0805
C19, C20, C21, C22, C23	5	100p	C-EUC0805	C0805
R37	1	10R	R-EU_R0805	R0805
R11, R12, R13, R14, R22	5	10k	R-EU_R0805	R0805
C48, C57, C58, C59, C60	5	10n	C-EUC0805	C0805
C61, C62	2	10u	C-EU050-024X044	C050-024X044
C3, C4, C5, C6, C15, C16, C17, C18, C28	9	10u	CPOL-EUB	PANASONIC_B
C68, C69, C71, C73	4	10uF	CPOL-EUB	PANASONIC_B
C11, C12, C13, C14	4	150p	C-EUC0805	C0805
R47	1	1k	R-EU_R0805	R0805
R46	1	1k2	R-EU_R0805	R0805
L5	1	1mH	L-EU6000-XXX-RC	6000-XXXX-RC
C1, C2, C26, C53, C54, C55, C56	7	1n	C-EUC0805	C0805
C65	1	2,2uF	C-EUC0805	C0805
VENT	1	22-27-2021-02	22-27-2021-02	6410-02
VSTUP	1	22-27-2041-04	22-27-2041-04	6410-04
J7	1	22-27-2061-06	22-27-2061-06	6410-06
C63	1	220uF	CPOL-EUE5-10.5	E5-10,5
R21	1	22k	R-EU_R0805	R0805
Q1, Q2	2	2N7002	2N7002	SOT23
R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10	8	2k2	R-EU_R0805	R0805
C38, C39, C40, C41, C47	5	2u2	C-EUC0805	C0805
C24	1	330p	C-EUC0805	C0805
C34, C35, C36, C37	4	33n	C-EUC0805	C0805
R28, R29, R30, R31, R32, R33, R34, R35, R36	9	3R3	R-EU_R0805	R0805
C49, C50, C51, C52, C75, C76, C77, C78	8	470n	C-EU150-072X183	C150-072X183
C7, C8	2	470p	C-EUC0805	C0805
C64, C66	2	470uF	CPOL-EUE5-10.5	E5-10,5
R15	1	47k	R-EU_R0805	R0805
C46	1	47u	CPOL-EUE3.5-10	E3,5-10
R38	1	4k7	R-EU_R0805	R0805
C25	1	4n7	C-EUC0805	C0805
R39, R45	2	560R	R-EU_R0805	R0805
L1, L2, L3, L4	4	7u	L-EUTJ7-U1	TJ7-U1
R48	1	820	R-EU_R0805	R0805
U4, U5	2	LM317DCY	LM317DCY	SOT230P
H5, H6	2	MOUNT-HOLE2.8	MOUNT-HOLE2.8	2,8
H1, H2, H3, H4	4	MOUNT-HOLE3.0	MOUNT-HOLE3.0	3
U1, U2	2	OPA1632D	OPA1632D	SO08
J1, J2, J3, J4, J5, J8	6	PIN2F061.040	PIN2F061.040	F061.040
IC1	1	TAS5630B	TAS5630B	PQFP64-PHD
U3	1	TL2575HV-15IN	TL2575HV-15IN	DIP254P

C DPS zdroja

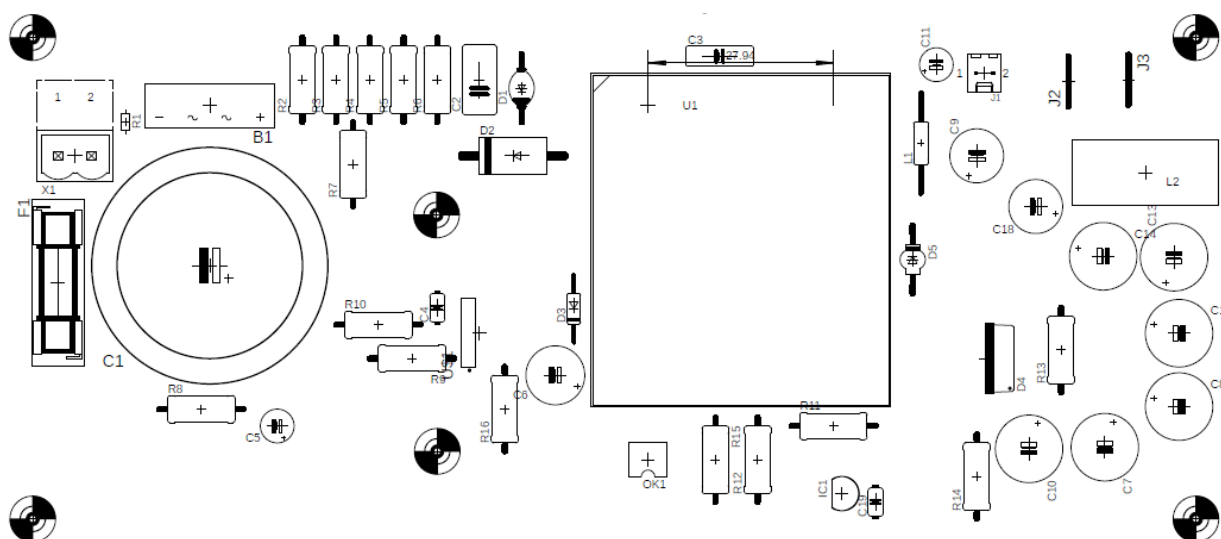
C.1 Schéma zapojenia



C.2 DPS – strana bottom



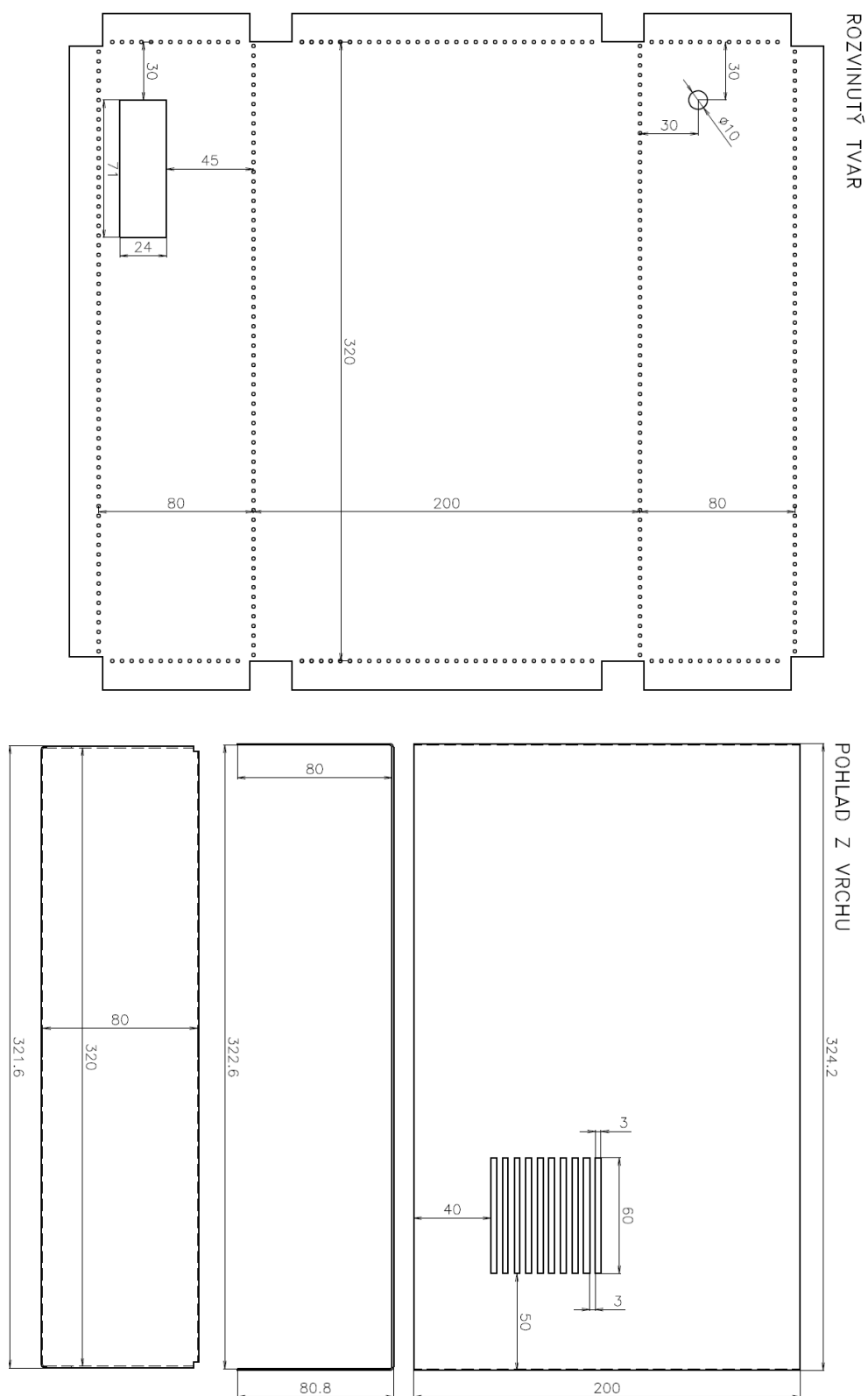
C.3 DPS – osazovací plán



C.4 Zoznam súčiastok

Označenie	Množstvo	Hodnota	Súčiastka	Puzdro
B1	1		KBL	KBL
X1	1		MSTBV2	MSTBV2
F1	1		SH22,5	SH22,5
C4	1	0,1u	C-EU050-024X044	C050-024X044
C11	1	100u	CPOL-EUE2-5	E2-5
C18	1	100u	CPOL-EUE3.5-8	E3,5-8
R14	1	10k7	R-EU_0411/12	0411/12
C6	1	10u	CPOL-EUE5-8.5	E5-8,5
R13	1	118k	R-EU_0411/12	0411/12
D3	1	1N914	1N4446	DO35-10
R15	1	1k	R-EU_0411/12	0411/12
R11	1	1k8	R-EU_0411/12	0411/12
L2	1	1u5	L-EUTJ4-U1	TJ4-U1
J1, J4, J5	3	22-27-2021-02	22-27-2021-02	6410-02
C9	1	220u	CPOL-EUE3.5-8	E3,5-8
C2	1	22n	C-EU075-052X106	C075-052X106
C1	1	330u	CPOL-EUE10-35	EB35D
C7, C8, C10, C12, C13, C14	6	330u	CPOL-EUE5-10.5	E5-10,5
C19	1	33n	C-EU050-024X044	C050-024X044
R2, R3, R4, R5, R6	5	36k	R-EU_0411/12	0411/12
C3	1	3n3	C-EU075-032X103	C075-032X103
L1	1	3u3	L-EU0207/15	0207/15
R16	1	470	R-EU_0411/12	0411/12
C5	1	47u	CPOL-EUE2-5	E2-5
R8, R9	2	4M7	R-EU_0411/12	0411/12
R7	1	5R	R-EU_0411/12	0411/12
R10	1	6R8	R-EU_0411/12	0411/12
R12	1	70R	R-EU_0411/12	0411/12
D2	1	BY500	DIODE-DO201-15	DO201-15
D5	1	BYV27	BYV27	SOD57-10
D4	1	BYV32	BYV32	TO220ABS
D1	1	BYW52	BYW52	DO204-10
U1	1	CPH-ETD44-1S-18P	CPH-ETD44-1S-18P	DIPS3556
OK1	1	PC817	PC817	DIL04
J2, J3	2	PIN2F061.040	PIN2F061.040	F061.040
R1	1	THERMISTOR-5	THERMISTOR-5	R-5
IC1	1	TL431CLPM	LM4041CILP	LP_O-PBCY-W3
U\$1	1	TOPSWITCH	TOPSWITCH	SW_TOP256EG

D Nákres prístrojovej skrine



E Fotodokumentácia

